

Projekt postrojenja za pripremu ultračiste vode za industriju poluvodiča

Horvat, Bruno

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:949809>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Bruno Horvat

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Hrvoje Juretić, dipl. ing.

Student:

Bruno Horvat

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Hrvoju Juretiću na izdvojenom vremenu, uloženom trudu, stručnoj pomoći i brojnim savjetima koji su bili od neprocjenjive važnosti.

Posebno zahvaljujem Ingrid Ani na bezuvjetnoj podršci koja mi je omogućila da ostvarim svoje ciljeve.

Također, zahvaljujem obitelji i prijateljima čiji su mi savjeti i druženja znatno olakšali i uljepšali studentske dane.

Bruno Horvat



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1 | |
| Ur.broj: 15 - 23 - | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Bruno Horvat** JMBAG: 0035206189

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projekt postrojenja za pripremu ultračiste vode za industriju poluvodiča**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Ultrapure water treatment plant design for semiconductor industry**

Opis zadatka:

Proizvodni procesi u industriji poluvodiča zahtijevaju ogromne količine ultračiste vode u gotovo svakoj fazi. Obrada sirove vode na najvišu razinu kvalitete složen je proces koji uključuje niz tehnologija pročišćavanja i najčešće se sastoji od predobrade, u kojoj se uklanjaju suspendirane i koloidne tvari, postupka demineralizacije te završnog uklanjanja tvari u tragovima.

Cilj ovog rada je dimenzionirati postrojenje za pripremu ultračiste vode kapaciteta 175 m³/h, pri čemu kvaliteta vode mora zadovoljavati zahtjeve relevantnih standarda (ASTM, SEMI).

Na raspolaganju je pitka voda iz sustava javne vodoopskrbe.

Rad treba sadržavati:

1. Osnovni proračun postrojenja;
2. Tehnološku shemu postrojenja s posudama, armaturom i opremom za automatski rad;
3. Prikaz utroška energije i kemikalija;
4. Prikaz smještaja postrojenja.

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

Zadatak zadan:

28. rujna 2023.

Datum predaje rada:

30. studenoga 2023.

Predviđeni datumi obrane:

4. – 8. prosinca 2023.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Juretić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

| | |
|---|-----|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | IV |
| POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE | V |
| POPIS OZNAKA | VI |
| SAŽETAK..... | X |
| SUMMARY | XI |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1. Voda..... | 2 |
| 1.2. Ultračista voda | 3 |
| 1.2.1. Klasifikacija ultračiste vode u industriji poluvodiča..... | 3 |
| 1.3. Postrojenje za proizvodnju ultračiste vode | 5 |
| 1.3.1. Primarna sekcija..... | 6 |
| 1.3.2. Sekundarna sekcija..... | 6 |
| 1.3.3. Tercijarna sekcija | 6 |
| 1.3.4. Skladištenje i distribucija..... | 7 |
| 2. TEHNOLOGIJE OBRADE VODE..... | 9 |
| 2.1. Taloženje (sedimentacija) | 9 |
| 2.1.1. Taložnici | 10 |
| 2.2. Filtracija | 11 |
| 2.2.1. Filtarska sredstva | 12 |
| 2.2.2. Filtracijski uređaji | 13 |
| 2.2.2.1. Filtri s granuliranim filtracijskim materijalom | 13 |
| 2.2.2.2. Membranski filtri | 15 |
| 2.2.2.3. Mikrofiltracija..... | 19 |
| 2.2.2.4. Ultrafiltracija..... | 19 |
| 2.2.2.5. Nanofiltracija | 20 |
| 2.2.2.6. Reverzna osmoza | 20 |
| 2.3. Ionska izmjena | 22 |
| 2.3.1. Vrste ionske izmjene..... | 22 |
| 2.3.2. Proračun volumena ionske mase..... | 23 |
| 2.3.3. Vrste ionskih izmjenjivača..... | 24 |
| 2.3.3.1. Slabo kisela kationska izmjena (K_1) | 24 |
| 2.3.3.2. Jako kisela kationska izmjena (K_2)..... | 24 |
| 2.3.3.3. Slabo bazna anionska izmjena (A_1) | 25 |
| 2.3.3.4. Jako bazna anionska izmjena (A_2)..... | 25 |
| 2.3.3.5. Ionski izmjenjivači s miješanim filtrom | 27 |
| 2.4. Membransko otplinjavanje..... | 28 |
| 2.5. Elektrodeionizacija u proizvodnji ultračiste vode..... | 29 |
| 2.6. UV oksidacija..... | 30 |
| 3. PRORAČUN POSTROJENJA ZA PRIPREMU ULTRAČISTE VODE..... | 32 |

| | |
|---|----|
| 3.1. Primarna sekcija | 33 |
| 3.1.1. Ionsko umekšavanje | 33 |
| 3.1.1.1. Volumen i visina ionske mase | 34 |
| 3.1.1.2. Regeneracija ionske mase | 36 |
| 3.1.1.3. Rekapitulacija | 38 |
| 3.1.2. Reverzna osmoza | 40 |
| 3.1.2.1. Uklanjanje slobodnog rezidualnog klora | 41 |
| 3.1.2.2. Doziranje antiskalanta | 43 |
| 3.1.2.3. Prvi prolaz RO sustava | 46 |
| 3.1.2.4. Drugi prolaz RO sustava | 47 |
| 3.1.2.5. Membransko otplinjavanje | 49 |
| 3.1.2.6. Spremnik RO permeata | 50 |
| 3.2. Poliranje kvalitete vode | 51 |
| 3.2.1. Miješani filter | 51 |
| 3.2.1.1. Volumen i visina ionske mase | 51 |
| 3.2.1.2. Protokol regeneracije | 52 |
| 3.2.1.3. Rekapitulacija | 56 |
| 3.2.2. UV reaktor | 57 |
| 3.2.3. Ultrafiltracija | 58 |
| 3.3. Cjevovodi | 59 |
| 3.4. Utrošak kemikalija | 65 |
| 3.5. Odabir pumpi | 66 |
| 3.6. Utrošak energije | 72 |
| 4. ZAKLJUČAK | 74 |
| LITERATURA | 75 |
| PRILOZI | 76 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 1. | Molekula vode [2] | 2 |
| Slika 2. | Dijagram toka postrojenja za proizvodnju ultračiste vode u industriji poluvodiča [4] | 7 |
| Slika 3. | Odnos sila na kuglastu česticu prilikom taloženja [5]..... | 9 |
| Slika 4. | Faktor otpora u ovisnosti o Reynoldsovom broju [1]..... | 10 |
| Slika 5. | Konvencionalna filtracija [1]..... | 11 |
| Slika 6. | Izravna filtracija [1]..... | 12 |
| Slika 7. | Kontaktna (<i>In-line</i>) filtracija [1]..... | 12 |
| Slika 8. | Tlačni filtar [1] | 14 |
| Slika 9. | Gravitacijski filtar [1]..... | 15 |
| Slika 10. | Princip rada membranske filtracije [1]..... | 17 |
| Slika 11. | Oblici blokiranja pora membrana [1] | 18 |
| Slika 12. | Vrećasti filtri [9]..... | 19 |
| Slika 13. | Uređaj za ultrafiltraciju [10]..... | 20 |
| Slika 14. | Reverzna osmoza [1] | 21 |
| Slika 15. | Rad ionskih izmjenjivača [1]..... | 26 |
| Slika 16. | Regeneracija ionskih izmjenjivača [1] | 27 |
| Slika 17. | Membranski otplinjivač [11] | 28 |
| Slika 18. | Shematski prikaz elektrodeionizacije [7] | 29 |
| Slika 19. | Uređaji za kontinuiranu elektrodeionizaciju [12]..... | 30 |
| Slika 20. | UV oksidacija [13] | 31 |
| Slika 21. | Početna stranica računalnog programa Wave | 33 |
| Slika 22. | Kvaliteta umekšane vode ovisno o utrošku soli za istosmjernu regeneraciju [1] . | 36 |
| Slika 23. | Shematski prikaz prvog prolaza RO sustava | 46 |
| Slika 24. | Shematski prikaz drugog prolaza RO sustava | 48 |
| Slika 25. | Dijagram s vrijednostima otplinjavanja CO ₂ [15]..... | 50 |
| Slika 26. | Karakteristike pumpe P1 | 67 |
| Slika 27. | Karakteristika pumpe P2 | 67 |
| Slika 28. | Karakteristika pumpe P5 | 68 |
| Slika 29. | Karakteristika pumpe P6 | 68 |
| Slika 30. | Karakteristika pumpe P13 | 69 |
| Slika 31. | Karakteristika pumpe P7 | 70 |
| Slika 32. | Karakteristika pumpe P10 | 70 |
| Slika 33. | Karakteristika pumpe P11 | 71 |
| Slika 34. | Karakteristika pumpe P12 | 72 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Zahtjevi za kvalitetu vode u industriji poluvodiča [3] | 4 |
| Tablica 2. Pregled tehnoloških postupaka obrade vode [1]..... | 9 |
| Tablica 3. Klasifikacija membranskih procesa u obradi vode [7]..... | 16 |
| Tablica 4. Kemijski sastav vodovodne pitke vode | 32 |
| Tablica 5. Protokol regeneracije ionske mase umekšivača | 38 |
| Tablica 6. Kemijski sastav vode nakon umekšavanja | 40 |
| Tablica 7. Pregled osnovnih parametara RO sustava | 41 |
| Tablica 8. Vijek trajanja vodene otopine natrijeva bisulfita [14]..... | 42 |
| Tablica 9. Vrijednosti indeksa zasićenja prema Langelieru..... | 44 |
| Tablica 10. Kvaliteta vode u prvom prolazu | 47 |
| Tablica 11. Kvaliteta vode u drugom prolazu | 49 |
| Tablica 12. Preporučeni radni uvjeti miješanog filtra | 51 |
| Tablica 13. Protokol regeneracije ionske mase miješanog filtra..... | 54 |
| Tablica 14. Kvaliteta vode nakon miješanog filtra..... | 57 |
| Tablica 15. Specifikacije membrane InegraFlux SFP - 2880XP..... | 58 |
| Tablica 16. Utrošak kemikalija | 66 |
| Tablica 17. Prikaz potrošnje energije procesa obrade vode | 72 |
| Tablica 18. Prikaz potrošnje energije pumpi..... | 73 |
| Tablica 19. Utrošak energije postrojenja po periodima | 73 |

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

1. FUNKCIONALNA SHEMA POSTROJENJA
2. DISPOZICIJA OPREME POSTROJENJA

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------------------------------|--|--|
| A_{filtrar} | m^2 | Površina miješanog filtra |
| A_p | m^2 | Površina poprečnog presjeka ionskog izmjenjivača |
| $A_{p,\text{um}}$ | m^2 | Površina poprečnog presjeka ionskog izmjenjivača za umekšavanje |
| AT_1 | val/L | Sadržaj aniona mineralnih kiselina |
| AT | val/L | Ukupna anionska tvrdoća |
| B | $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{bar}^{-1}$ | Koeficijent permeabilnosti otopljene tvari |
| BT | val/L | Bazna tvrdoća |
| c_{an} | g/L | Koncentracija antiskalanta |
| CaT | val/L | Kalcijeva tvrdoća |
| c_{Cl_2} | mg/L | Koncentracija slobodnog rezidualnog klora u pitkoj vodi |
| C_D | - | Faktor otpora |
| $c_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5}$ | g/L | Koncentracija natrijevog metabisulfita |
| c_p | mg/L | Koncentracija otopljenih tvari u permeatu |
| c_u | mg/L | Koncentracija otopljenih tvari u ulaznoj vodi |
| d_{filtrar} | m | Promjer miješanog filtra |
| $d_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ | g/L | Regeneracijska doza sulfatne kiseline |
| d_{NaCl} | g/L | Regeneracijska doza natrijevog klorida |
| $d_{u,\text{um}}$ | m | Unutarnji promjer ionskog izmjenjivača za umekšavanje |
| $d_{v,\text{um}}$ | m | Vanjski promjer ionskog izmjenjivača za umekšavanje |
| E_p | kWh/dan | Utrošak energije pumpi za vodu |
| $E_t (\text{Ca}^{2+})$ | mg/mval | Ekvivalentna težina kalcijevih iona |
| $E_t (\text{Mg}^{2+})$ | mg/mval | Ekvivalentna težina magnezijevih iona |
| E_{UK} | kWh/dan | Ukupni utrošak energije postrojenja |
| $E_{\text{UK,P}}$ | kWh/dan | Ukupni utrošak energije procesa za obradu vode |
| E_{UV} | kWh/dan | Ukupni utrošak energije UV reaktora |
| F_g | N | Sila gravitacije |
| F_r | N | Rezultantna sila |
| F_u | N | Sila uzgona |
| H_{A2} | m | Visina jako bazne ionske mase miješanog filtra |
| H_{K2} | m | Visina jako kisele ionske mase miješanog filtra |
| $H_{m,\text{mb}}$ | m | Ukupna visina ionske mase miješanog filtra |
| $h_{m,\text{um}}$ | m | Visina ionske mase ionskog izmjenjivača za umekšavanje |
| H_p | m | Visina posude miješanog filtra |
| $H_{p,\text{um}}$ | m | Visina posude ionskog izmjenjivača za umekšavanje |
| J_p | $\text{L m}^{-2} \text{s}^{-1}$ | Fluks permeata kroz membranu sustava reverzne osmoze |
| $J_{p,1}$ | $\text{L m}^{-2} \text{s}^{-1}$ | Uprosječeni fluks permeata kroz membrane prvog prolaza sustava reverzne osmoze |

| | | |
|--------------------|----------------------------|--|
| $J_{p,2}$ | $L m^{-2} s^{-1}$ | Uprosječeni fluks permeata kroz membrane drugog prolaza sustava reverzne osmoze |
| J_s | $mol m^{-2} s^{-1}$ | Fluks otopljene tvari |
| J_w | $m^3 m^{-2} s^{-1}$ | Volumetrijski fluks permeata |
| K_k | val/L | Korisni kapacitet ionske mase |
| L_p | $L m^{-2} s^{-1} bar^{-1}$ | Permeabilnost membrane |
| m_{alk} | val/L | m alkalitet vode |
| $m_{100\%H_2SO_4}$ | kg | Masa 100%-tne sulfatne kiseline |
| $m_{100\%NaCl}$ | kg | Masa 100%-tnog natrijevog klorida |
| $m_{100\%NaOH}$ | kg | Masa 100%-tnog natrijevog hidroksida |
| $m_{26\%NaCl}$ | kg | Masa 26%-tne vodene otopine natrijevog klorida |
| $m_{30\%NaOH}$ | kg | Masa 30%-tne vodene otopine natrijevog hidroksida |
| $m_{98\%H_2SO_4}$ | kg | Masa 98%-tne otopine sulfatne kiseline |
| m_{an} | kg | Masa antiskalanta |
| MgT | val/L | Magnezijeva tvrdoća |
| N_{o,CO_2} | - | Broj modula membranskog otplinjivača |
| p_1 | bar | Ulazni tlak u prvi prolaz membranskog sustava reverzne osmoze |
| p_2 | bar | Ulazni tlak u drugi prolaz membranskog sustava reverzne osmoze |
| $Q_{26\%,NaCl}$ | m^3/h | Volumni protok 26%-tne vodene otopine natrijevog klorida |
| $Q_{30\%,NaHSO_3}$ | m^3/h | Volumni protok 30%-tne vodene otopine natrijevog metabisulfita |
| Q_{an} | m^3/h | Volumni protok antiskalanta |
| $Q_{k,1}$ | m^3/h | Volumni protok koncentrata prvog prolaza membranskog sustava reverzne osmoze |
| $Q_{k,2}$ | m^3/h | Volumni protok koncentrata drugog prolaza membranskog sustava reverzne osmoze |
| $Q_{k,o,1}$ | m^3/h | Volumni protok koncentrata prvog prolaza membranskog sustava reverzne osmoze koji se baca |
| $Q_{k,o,2}$ | m^3/h | Volumni protok koncentrata drugog prolaza membranskog sustava reverzne osmoze koji se baca |
| q_{m,Cl_2} | kg/h | Maseni protok slobodnog rezidualnog klora |
| $q_{m,an}$ | kg/h | Maseni protok antiskalanta |
| $q_{m,NaHSO_3}$ | kg/h | Maseni protok natrijevog metabisulfita |
| $Q_{n,u,1}$ | m^3/h | Neto ulazni volumni protok u prvi prolaz membranskog sustava reverzne osmoze |
| $Q_{n,u,2}$ | m^3/h | Neto ulazni volumni protok u drugi prolaz membranskog sustava reverzne osmoze |
| Q_p | m^3/h | Protok permeata membranskog sustava reverzne osmoze |
| $Q_{p,1}$ | m^3/h | Protok permeata prvog prolaza membranskog sustava reverzne osmoze |
| $Q_{p,2}$ | m^3/h | Protok permeata drugog prolaza membranskog sustava reverzne osmoze |

| | | |
|-------------------|---------|---|
| $Q_{r,o,1}$ | m^3/h | Volumni protok koncentrata prvog prolaza membranskog sustava reverzne osmoze koji se recirkulira |
| $Q_{r,o,2}$ | m^3/h | Volumni protok koncentrata drugog prolaza membranskog sustava reverzne osmoze koji se recirkulira |
| Q_u | m^3/h | Protok ulazne zahvaćene vode |
| $Q_{u,1}$ | m^3/h | Ulazni protok u prvi prolaz membranskog sustava reverzne osmoze |
| $Q_{u,2}$ | m^3/h | Ulazni protok u drugi prolaz membranskog sustava reverzne osmoze |
| $Q_{ul,1}$ | m^3/h | Ulazni protok vodovodne vode u jednu posudu ionskog izmjenjivača za umekšavanje |
| $Q_{ul,mb}$ | m^3/h | Ulazni protok u jednu posudu miješanog filtra |
| R | % | Faktor separacije |
| S_p | m^2 | Hidrauličko opterećenje miješanog filtra |
| $s_{p,um}$ | m | Debljina stijenke ionskog izmjenjivača za umekšavanje |
| UT | val/L | Ukupna tvrdoća |
| $V_{10\%NaCl}$ | m^3 | Volumen 10%-tne vodene otopine natrijevog klorida |
| $V_{26\%NaCl}$ | m^3 | Volumen 26%-tne vodene otopine natrijevog klorida |
| $V_{30\%NaOH}$ | m^3 | Volumen 30%-tne vodene otopine natrijevog hidroksida |
| $V_{4\%NaOH}$ | m^3 | Volumen 4%-tne vodene otopine natrijevog hidroksida |
| $V_{5\%H_2SO_4}$ | m^3 | Volumen 5%-tne vodene otopine sulfatne kiseline |
| $V_{98\%H_2SO_4}$ | m^3 | Volumen 98%-tne sulfatne kiseline |
| V_{A2} | m^3 | Volumen jako bazne ionske mase miješanog filtra |
| V_{an} | m^3 | Volumen antiskalanta |
| V_k | m^3 | Volumen koncentrata |
| V_{K2} | m^3 | Volumen jako kisele ionske mase miješanog filtra |
| $v_{lin,um}$ | m/h | Linearna brzina ionskog izmjenjivača za umekšavanje |
| V_m | m^3 | Volumen ionske mase |
| $V_{m,mb}$ | m^3 | Volumen ionske mase miješanog filtra |
| $V_{m,um}$ | m^3 | Volumen ionske mase ionskog izmjenjivača za umekšavanje |
| $V_{s,26\%NaCl}$ | m^3 | Volumen spremnika 26%-tne vodene otopine natrijevog klorida |
| V_{s,H_2SO_4} | m^3 | Volumen spremnika sulfatne kiseline |
| $V_{s,NaOH}$ | m^3 | Volumen spremnika vodene otopine natrijevog hidroksida |
| $V_{s,um}$ | m^3 | Volumen spremnika umekšane vode |
| $V_{s,NaHSO_3}$ | m^3 | Volumen spremnika natrijevog metabisulfita |
| V_u | m^3 | Volumen ulazne vode |
| $V_{um,10\%NaCl}$ | m^3 | Volumen umekšane vode za razrjeđenje 26%-tne vodene otopine natrijevog klorida na 10%-tnu |
| Y | % | Stupanj konverzije |
| Y_1 | % | Stupanj konverzije prvog prolaza membranskog sustava reverzne osmoze |

| | | |
|-------------------------------------|----------------------|---|
| Y_2 | % | Stupanj konverzije drugog prolaza membranskog sustava reverzne osmoze |
| ΔC_s | kmol m^{-3} | Razlika koncentracija otopljene tvari na membrani |
| π | bar | Osmotski tlak |
| Δp | Pa | Pad tlaka |
| ρ | kg/m^3 | Gustoća |
| $\Delta \pi$ | bar | Razlika osmotskih tlakova na membrani |
| $\rho_{26\% \text{NaCl}}$ | kg/m^3 | Gustoća 26%-tne vodene otopine natrijevog klorida |
| $\rho_{10\% \text{NaCl}}$ | kg/m^3 | Gustoća 10%-tne vodene otopine natrijevog klorida |
| $\rho_{98\% \text{H}_2\text{SO}_4}$ | kg/m^3 | Gustoća 98%-tne sulfatne kiseline |
| $\rho_{5\% \text{H}_2\text{SO}_4}$ | kg/m^3 | Gustoća 5%-tne vodene otopine sulfatne kiseline |
| $\rho_{30\% \text{NaOH}}$ | kg/m^3 | Gustoća 30%-tne vodene otopine natrijevog hidroksida |
| $\rho_{4\% \text{NaOH}}$ | kg/m^3 | Gustoća 4%-tne vodene otopine natrijevog hidroksida |
| ρ_{an} | kg/m^3 | Gustoća antiskalanta |

SAŽETAK

Projekt zadatak ovog diplomskog rada bio je dimenzionirati postrojenje za pripremu ultračiste vode u industriji poluvodiča kapaciteta 175 m³/h pri čemu ultračista voda mora zadovoljiti zahtjeve relevantnih standarda. Proizvodni procesi u industriji poluvodiča zahtijevaju ogromne količine ultračiste vode u gotovo svakoj fazi. Obrada sirove vode na najvišu razinu kvalitete složen je proces koji uključuje niz tehnologija pročišćavanja i najčešće se sastoji od predobrade, u kojoj se uklanjaju suspendirane i koloidne tvari, postupka demineralizacije te završnog uklanjanja tvari u tragovima.

U uvodu ovog rada definirani su postavljeni zahtjevi na razinu kvalitete vode u industriji poluvodiča prema ASTM standardu. Opisan je način rada i izazovi postrojenja za proizvodnju ultračiste vode u industriji poluvodiča. Nadalje, teorijski su prikazani tehnološki procesi obrade vode koji se mogu primijeniti na industrijska postrojenja, ali i na male sustave.

U drugom dijelu rada dimenzionirano je postrojenje za proizvodnju ultračiste vode u industriji poluvodiča. Proračun ionskih izmjenjivača i membranskih sustava izrađen je uz pomoć računalnog programa *Wave (Water Application Value Engine)* američke tvrtke DuPont što je pomoglo u odabiru ispravnih konfiguracija tehnoloških procesa obrade vode uz zadovoljavanje svih zadanih parametara opreme. Proračuni tehnoloških procesa koji nisu obuhvaćeni ovim računalnim programom izrađeni su zasebno. Prikazan je utrošak kemikalija u tehnološkim procesima te utrošak energije potrebne za vođenje ovakvog postrojenja. Na kraju, priložena je tehnološka shema postrojenja te tlocrtni prikaz smještaja opreme.

Ključne riječi: ultračista voda, industrija poluvodiča, ionska izmjena, umekšavanje, reverzna osmoza, ionska izmjena miješanim filtrom, membransko otplinjavanje, UV oksidacija, ultrafiltracija.

SUMMARY

The project task of this master's thesis was to design a facility for the preparation of ultrapure water in the semiconductor industry with a capacity of 175 m³/h, where ultrapure water must meet the stringent requirements of relevant standards. Manufacturing processes in the semiconductor industry require vast amounts of ultrapure water at almost every stage. Treating raw water to the highest level of quality is a complex process that involves a series of purification technologies, typically consisting of pretreatment, where suspended and colloidal substances are removed, demineralization, and final removal of trace substances.

In the introduction of this thesis, the requirements for the water quality level in the semiconductor industry according to ASTM standards were defined. The operation and challenges of the ultrapure water production facility in the semiconductor industry were described. Furthermore, a theoretical presentation of water treatment processes applicable to both industrial-scale facilities and smaller systems is provided.

In the second part of the thesis, the facility for the production of ultrapure water in the semiconductor industry was dimensioned. The calculation of ion exchangers and membrane systems was facilitated by the computer program Wave (Water Application Value Engine) from the American company DuPont. This program aided in selecting appropriate configurations of water treatment processes while adhering to all specified equipment parameters. Calculations for technological processes not covered by this computer program were done separately. The consumption of chemicals in technological processes and the energy consumption needed to operate such a facility were presented. Finally, a technological scheme of the facility, along with a floor plan showing the equipment layout, was provided.

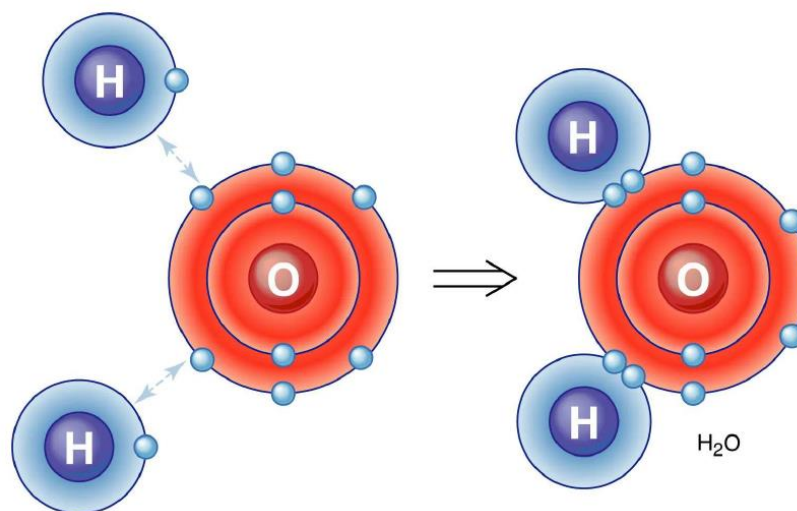
Key words: ultrapure water, semiconductor industry, ion exchange, softening, reverse osmosis, mixed bed ion exchange, membrane degasification, UV oxidation, ultrafiltration.

1. UVOD

Industrija poluvodiča, temelj modernih tehnologija, potiče sve veći napredak u brojnim sektorima elektroindustrije među kojima je proizvodnja mikročipova. Mikročip je skup elektroničkih sklopova na maloj, plosnatoj polisilikonskoj pločici (engl. *wafer*). Na čipu tranzistori djeluju kao minijaturni električni prekidači koji mogu uključiti ili isključiti protok elektrona, ovisno o njegovoj funkciji. Mikročipovi veličine ljudskog nokta sadrže milijardu tranzistora što upućuje na izrazito male dimenzije ovih proizvoda. Radi usporedbe, crvene krvne stanice, eritrociti, imaju ekvivalentni promjer oko 7000 nm, a prosječni virus oko 300 nm. Trenutno, najnapredniji mikročipovi imaju specifičnu dimenziju 10 nm. Smanjivanjem dimenzija, uz održavanje iste funkcije, moguće je značajno utjecati na računalnu i operativnu moć elektroničkih uređaja. Prilikom proizvodnje, ingot čistog polisilikona mora proći niz postupaka kako bi se dobio konačan proizvod. Ovi proizvodni postupci moraju se izvoditi pod vrlo strogim uvjetima u čistim prostorijama. Naime, bilo kakva prisutnost neželjenih čestica organske ili anorganske prirode može utjecati na funkcionalnost mikročipova te time i uređaja u kojem se koristi. Postrojenja za proizvodnju poluvodičkih proizvoda koriste ogromne količine vode kako bi se omogućila željena funkcionalnost proizvoda. Pritom se koristi voda vrlo visoke čistoće, odnosno ultračista voda. U brojnim fazama proizvodnje, ultračista voda se koristi za postupke čišćenja i ispiranja površina te kemijsko-mehaničke planarizacije. Današnji proizvodni pogoni u industriji poluvodiča zahtijevaju do 2000 gal/min, odnosno približno 10000000 L/dan ultračiste vode što ukazuje na njenu ključnu ulogu.

1.1. Voda

Molekula vode, H_2O , sastoji se od dva atoma vodika i jednog atoma kisika te predstavlja najrasprostranjeniju molekulu na Zemlji koja ujedno ima i najveći značaj za živi svijet. Većina vode na Zemlji, točnije 97% količine, nalazi se u oceanima i morima. 2% ukupne količine sadržano je u čvrstom stanju kao polarni led, a samo mali preostali dio čine podzemne vode, rijeke, jezera, vlaga u tlu i vodena para u atmosferi. Osim što je najrasprostranjenija tvar na Zemljinoj površini, voda je jedini kemijski spoj koji se u prirodnom stanju može naći u tri agregatna stanja, odnosno u čvrstom, kapljevitom i plinovitom [1].



Slika 1. Molekula vode [2]

Voda ima velik značaj zbog svojih jedinstvenih kemijskih i fizikalnih svojstava. Atom kisika i atomi vodika u jednoj molekuli vode vezani su kovalentnim vezama nastalim međusobnom podjelom elektrona. Međutim, ti elektroni nisu jednako podijeljeni između atoma. S obzirom na to da je atom kisika elektronegativniji, on jače privlači elektrone te dobiva blago negativan naboj, a samim time atomi vodika blago pozitivan naboj. Zbog ove nejednolike raspodjele elektrona vodu smatramo polarnom molekulom. To svojstvo omogućava jednoj molekuli vode vezanje s drugim molekulama vode. Djelomično negativni atom kisika se veže za djelomično pozitivan atom vodika iz druge molekule te tako tvori vodikovu vezu. Svaka molekula vode veže se vodikovim vezama sa četiri ostale molekule vode. Zahvaljujući polarnosti, voda je izvrsno otapalo za mnoge spojeve. Time je u prirodi omogućen transport minerala, hranjivih tvari, ali i onečišćivala. Voda ima visoku gustoću, a najveću vrijednost postiže pri $3,98\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ovaj fenomen anomalije vode omogućuje opstanak životinjskog svijeta ispod razine mora. Utjecaju na klimatske prilike na Zemlji pridonosi svojim neobično visokim specifičnim toplinskim

kapacitetom ($4,184 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ pri $20 \text{ }^\circ\text{C}$). Pri normalnim uvjetima, točka vrelišta vode postiže se na $100 \text{ }^\circ\text{C}$, a tališta na $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Zbog vrlo visoke specifične topline isparavanja, voda je sastavni dio svakog energetskog postrojenja današnjice [1].

1.2. Ultračista voda

Primarni potrošači ultračiste vode su nuklearna i termoenergetska postrojenja, farmaceutska industrija i industrija poluvodiča. Voda visokog stupnja čistoće i para koja proizlazi iz te vode smanjuju rizik od nastanka korozije te formiranja naslaga na opremi i posudama pod tlakom. To znatno povećava pouzdanost i efikasnost rada ovakvih postrojenja te pozitivno utječe na ekonomičnost. Također, ultračista voda je primarna sirovina u izradi farmaceutskih proizvoda.

U industriji poluvodiča i elektronike voda se primarno koristi za ispiranje komponenata prilikom proizvodnje. Također, koristi se za procese čišćenja i jetkanja, proizvodnju pare za oksidaciju silicijskih površina, pripremu fotomaski za primjenu fotolitografije te kao pomoćno sredstvo u prevlačenju luminiscentnim materijalima. S obzirom na to da se prilikom proizvodnje elektroničke i mikroelektroničke opreme komponente ne smiju kontaminirati, potrebno je koristiti vodu koja ne sadrži netopive čestice, ione i ostale strane tvari, odnosno ultračistu vodu. U suprotnom, prisutnost čestica, čije se dimenzije kreću između par nanometara do par mikrometara, u mikroelektroničkoj opremi mogu uzrokovati potpuni kvar čime oprema postaje neupotrebljiva. Zahtjevi za stupnjem čistoće ultračiste vode rastu smanjivanjem dimenzija mikročipova, odnosno smanjivanjem udaljenosti između tranzistora (engl. *linewidth*) [3].

1.2.1. Klasifikacija ultračiste vode u industriji poluvodiča

Prema normi ASTM D 5127 – 07 ultračista voda može se podijeliti na šest klasa:

- Tip E-1 podrazumijeva vodu koja se koristi u proizvodnji mikroelektroničkih uređaja s udaljenošću između tranzistora u intervalu od $0,5$ do $1,0 \text{ } \mu\text{m}$.
- Tip E-1.1 podrazumijeva vodu koja se koristi u proizvodnji mikroelektroničkih uređaja s udaljenošću između tranzistora u intervalu od $0,25$ do $0,35 \text{ } \mu\text{m}$.
- Tip E-1.2 podrazumijeva vodu koja se koristi u proizvodnji mikroelektroničkih uređaja s udaljenošću između tranzistora u intervalu od $0,09$ do $0,18 \text{ } \mu\text{m}$. Ovo je voda iznimno visoke čistoće. Priprema se u velikim količinama, a namijenjena je za najzahtjevnije potrebe.

- Tip E-2 podrazumijeva vodu koja se koristi u proizvodnji mikroelektroničkih uređaja s udaljenošću između tranzistora u intervalu od 1 do 5 μm .
- Tip E-3 podrazumijeva vodu koja se koristi u proizvodnji mikroelektroničkih uređaja s udaljenošću između tranzistora većom od 5 μm . Odnosi se na komponente većih dimenzija na čija svojstva nečistoće u tragovima neće bitno utjecati.
- Tip E-4 podrazumijeva vodu koja se koristi u pripremi otopina za prevlačenje materijala i druge primjene gdje voda može biti nižeg stupnja čistoće.

Bitno je napomenuti da se voda klasa E-1, E-1.1, E-1.2, E-2 i E-3 ne može skladištiti, a da se pritom zadrži željeni stupanj čistoće. Zahtjevi ovih klasa odnose se na vodu koja je prošla završnu obradu te je spremna za izravno korištenje.

Tablica 1. Zahtjevi za kvalitetu vode u industriji poluvodiča [3]

| Parametar | Klasa E-1 | Klasa E-1.1 | Klasa E-1.2 | Klasa E-2 | Klasa E-3 | Klasa E-4 | Mjerna jedinica |
|------------------------------|-----------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|------------------------|
| Širina linije | 1,0-0,5 | 0,35-0,25 | 0,18-0,09 | 5,0-1,0 | >5,0 | - | μm |
| Električna otpornost na 25°C | 18,1 | 18,2 | 18,2 | 16,5 | 12 | 0,5 | M Ω cm |
| Ukupni organski ugljik | 5 | 2 | 1 | 50 | 300 | 1000 | $\mu\text{g/L}$ |
| Otopljeni kisik | 25 | 10 | 3 | - | - | - | $\mu\text{g/L}$ |
| Bakterije u 100 mL uzorka | 5 | 3 | 1 | 10 | 50 | 100 | broj izraslih kolonija |
| Ukupni SiO ₂ | 5 | 3 | 1 | 10 | 50 | 1000 | $\mu\text{g/L}$ |
| Amonij | 0,1 | 0,10 | 0,05 | - | - | - | $\mu\text{g/L}$ |
| Bromid | 0,1 | 0,05 | 0,02 | - | - | - | $\mu\text{g/L}$ |

| | | | | | | | |
|----------|------|------|-------|---|----|------|------|
| Klorid | 0,1 | 0,05 | 0,02 | 1 | 10 | 1000 | µg/L |
| Fluorid | 0,1 | 0,05 | 0,03 | - | - | - | µg/L |
| Nitrat | 0,1 | 0,05 | 0,02 | 1 | 5 | 500 | µg/L |
| Nitrit | 0,1 | 0,05 | 0,02 | - | - | - | µg/L |
| Fosfat | 0,1 | 0,05 | 0,02 | 1 | 5 | 500 | µg/L |
| Sulfat | 0,1 | 0,05 | 0,02 | 1 | 5 | 500 | µg/L |
| Aluminij | 0,05 | 0,02 | 0,005 | - | - | - | µg/L |
| Barij | 0,05 | 0,02 | 0,001 | - | - | - | µg/L |
| Bor | 0,3 | 0,1 | 0,05 | - | - | - | µg/L |
| Kalcij | 0,05 | 0,02 | 0,002 | - | - | - | µg/L |
| Krom | 0,05 | 0,02 | 0,002 | - | - | - | µg/L |
| Bakar | 0,05 | 0,02 | 0,002 | 1 | 2 | 500 | µg/L |
| Željezo | 0,05 | 0,02 | 0,002 | - | - | - | µg/L |
| Olovo | 0,05 | 0,02 | 0,005 | - | - | - | µg/L |
| Litij | 0,05 | 0,02 | 0,003 | - | - | - | µg/L |
| Magnezij | 0,05 | 0,02 | 0,002 | - | - | - | µg/L |
| Mangan | 0,05 | 0,02 | 0,002 | - | - | - | µg/L |
| Nikal | 0,05 | 0,02 | 0,002 | 1 | 2 | 500 | µg/L |
| Kalij | 0,05 | 0,02 | 0,005 | 2 | 5 | 500 | µg/L |
| Natrij | 0,05 | 0,02 | 0,005 | 1 | 5 | 1000 | µg/L |
| Stroncij | 0,05 | 0,02 | 0,001 | - | - | - | µg/L |
| Cink | 0,05 | 0,02 | 0,002 | 1 | 5 | 500 | µg/L |

1.3. Postrojenje za proizvodnju ultračiste vode

Proizvodnja ultračiste vode dijeli se u nekoliko grupa procesa kako bi se zadovoljio zahtjev industrije poluvodiča za uklanjanjem svih čestica koje su za 10% veće od minimalne dimenzije željenog proizvoda. Ovi procesi uključuju predobradu vode, demineralizaciju, uklanjanje organskih i bioloških tvari, uklanjanje čestica te skladištenje i distribuiranje. Obično se provode kroz tri sekcije: primarna, sekundarna i tercijarna [3].

1.3.1. Primarna sekcija

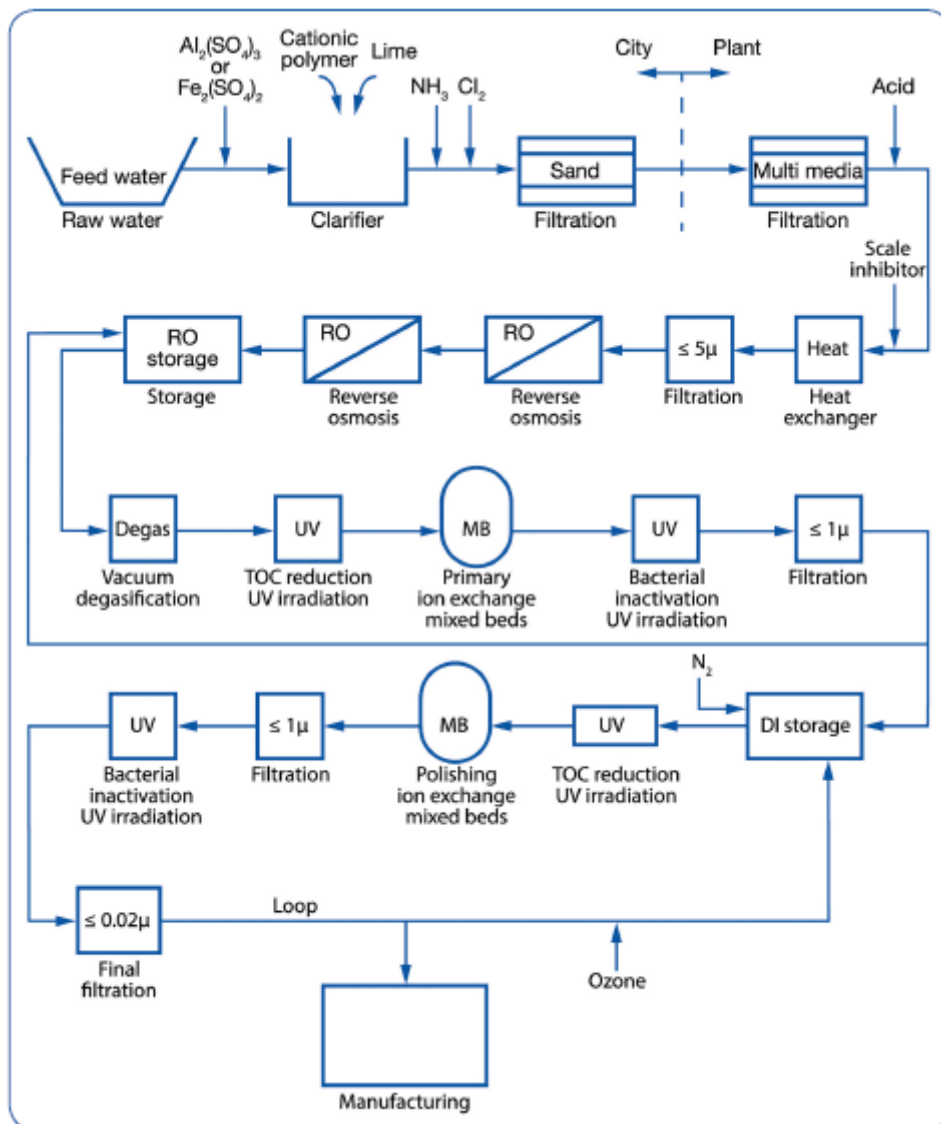
U ovom dijelu postrojenja obavlja se primarno pročišćavanje vode koja je prošla predobradu. Postupci pročišćavanja vode prilikom predobrade na prvom mjestu podrazumijevaju uklanjanje suspendiranih čestica u taložnicima i flotatorima prilikom čega se dodaju razne vrste koagulanata i flokulanata radi pospješivanja procesa taloženja. Također, podrazumijeva procese filtracije (jednokratni, pješčani, membranski filtri). Filtarski medij pritom može biti aktivni ugljen i mnogi drugi mediji specifični za određene organske i anorganske nečistoće. Ovi su procesi nužni kako bi se smanjila mogućnost oštećivanja uređaja za pročišćavanje prilikom primarne, sekundarne i tercijarne sekcije. Pročišćena voda u ovoj sekciji odgovara parametrima klase E-4 te se može i ne mora skladištiti prije dodatnog pročišćavanja.

1.3.2. Sekundarna sekcija

Pročišćenoj vodi iz primarne sekcije povećava se stupanj čistoće na razinu klase E-3. Karakteristični procesi za ovu sekciju su uklanjanje organskih i bioloških tvari, uklanjanje čestica te dodatni procesi demineralizacije ukoliko je to potrebno. Organske tvari mogu se prilikom proizvodnje mikročipova i ostalih mikroelektroničkih komponenti akumulirati na kritičnim mjestima te tako naštetiti funkciji proizvoda. Uglavnom, metode kojima se umanjuje ova kontaminacija su dodavanje vodikova peroksida i ozona ili izlaganje ultraljubičastom zračenju. Djelovanje ultraljubičastog zračenja valne duljine 185 nm uzrokuje razgradnju molekula vode na hidroksilne radikale, atome vodika i hidratizirane elektrone. Hidroksilni radikali, snažni oksidansi koji nastaju fotolizom vode, razgrađuju organske spojeve u vodi na njihove kiseline i ugljikov dioksid. Tako se ujedno smanjuje udio ukupnog organskog ugljika (engl. *Total Organic Carbon - TOC*). Ultraljubičasto zračenje valne duljine 254 nm značajno reducira rast organizama dislocirajući parove baza DNA što sprječava repliciranje bakterija. Također, za uklanjanje bioloških nečistoća i organskih tvari mogu se koristiti i određeni membranski filtri. Demineralizacija vode podrazumijeva uklanjanje svih tvari iz vode osim plinova. To su jedan ili više procesa ionske izmjene, reverzne osmoze i kontinuirane elektrodeionizacije. Uglavnom gabariti samog postrojenja utječu na odabir kombinacije procesa koji će se koristiti u svrhu demineralizacije. Ova voda može se skladištiti u zaštićenom spremniku, ali kroz kraći vremenski period kako ne bi došlo do degradacije njezine kvalitete. Preporučuje se direktno korištenje ili dodatno pročišćavanje, ovisno o zahtjevima.

1.3.3. Tercijarna sekcija

Ultračista voda se dovodi na razinu klasa E-1, E-1.1, E-1.2 ili E-2. Uklanjaju se ioni metala i nemetala, organske tvari i fine čestice. Tercijarna sekcija sadrži uređaje za ionsku izmjenu, elektrodeionizaciju, tretiranje UV zrakama te za konačnu filtraciju. Dobivena voda se ne smije skladištiti već se mora direktno koristiti te kontinuirano recirkulirati.



Slika 2. Dijagram toka postrojenja za proizvodnju ultračiste vode u industriji poluvodiča [4]

1.3.4. Skladištenje i distribucija

Skladištenje ultračiste vode predstavlja veliki izazov zbog nečistoća koje se nakupljaju u vodi s materijala u kojem se skladišti. Parametri koji utječu na stupanj čistoće prilikom skladištenja su topivost nečistoća, površina dodira te vrijeme izloženosti materijalu opreme za skladištenje i okolišnjem zraku. Zato je prikladno koristiti spremnike što manjeg volumena kako bi se umanjio njihov negativni utjecaj. Posebna pažnja se nekad pridaje atmosferi iznad samog spremnika u kojem se čuva pročišćena voda. Uobičajena je upotreba dušika visokog stupnja

čistoće (>99,999 %) koji služi kao zaštitna opna protiv plinova iz atmosfere. Kako bi se zadovoljili zahtjevi klasa E-1, E-1.1 i E-1.2, materijal cjevovoda za distribuciju ultračiste vode mora biti PVDF (poliviniliden fluorid), čelik AISI 316L ili jednakovrijedni materijali.

2. TEHNOLOGIJE OBRADE VODE

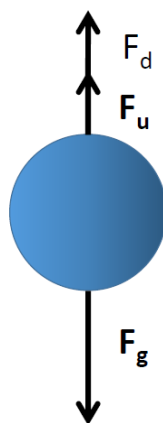
Prirodne vode sadrže različite suspendirane tvari, otopljene anorganske i organske spojeve. Predmet ovog rada je industrija poluvodiča, što znači da voda iz odabranog izvora mora zadovoljiti najstrože uvjete što se tiče njene kvalitete. Kako bi se to postiglo, potrebno je koristiti prikladne tehnologije obrade vode.

Tablica 2. Pregled tehnoloških postupaka obrade vode [1]

| RASPON VELIČINA PRIRODNIH NEČISTOĆA | | | |
|--|--|--|---|
| Grube disperzije anorganskog i organskog porijekla | Koloidne disperzije | | Molekularne disperzije |
| | <u>Organske</u> | <u>Anorganske</u> | |
| 10 - 10 ⁻³ mm | Huminske tvari 10 ⁻³ -10 ⁻⁵ mm | Gline, Fe ₂ O ₃ , SiO ₂ 10 ⁻³ -10 ⁻⁵ mm | Otopljene soli - ioni 10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁷ mm |
| | | | Plinovi CO ₂ , O ₂ , N ₂ , H ₂ S, CH ₄ |
| TEHNOLOŠKI POSTUPCI PRIPREME VODE | | | |
| ZADRŽAVANJE NA SITIMA SEDIMENTACIJA CENTRIFUGALNA SEPARACIJA | FLOKULACIJA I KOAGULACIJA SEDIMENTACIJA FILTRACIJA MEMBRANSKI POSTUPCI OKSIDACIJSKI POSTUPCI | | IONSKA IZMJENA MEMBRANSKI POSTUPCI |
| | | | RAZNI POSTUPCI OTPLINJAVANJA |

2.1. Taloženje (sedimentacija)

Postupci taloženja primjenjuju se za odstranjivanje suspendiranih tvari koje imaju dovoljnu gustoću i veličinu čestica da se istalože u prihvatljivom vremenu. Da bi se uočio efekt sedimentacije treba razmotriti ravnotežu sila koje djeluju na česticu volumena V i gustoće ρ_c potopljenu u fluid gustoće ρ . Na česticu djeluje sila gravitacije F_g i sila uzgona F_u prema sljedećoj slici.



Slika 3. Odnos sila na kuglastu česticu prilikom taloženja [5]

Razlika ovih sila, ukoliko je različita od nule, djeluje ubrzavajuće na česticu. Ovisno o odnosu gustoće čestice i fluida, čestica će:

- se podizati (za $\rho > \rho_\varepsilon$), ili
- tonuti (za $\rho < \rho_\varepsilon$).

Pojavom rezultante sile F_r i ubrzavanjem čestice pojavljuje se i sila otpora F_v . Uspostavom nove ravnoteže prestaje ubrzavanje čestice te se odvija gibanje pri konstantnoj brzini v . Sila otpora F_r dobiva se iz:

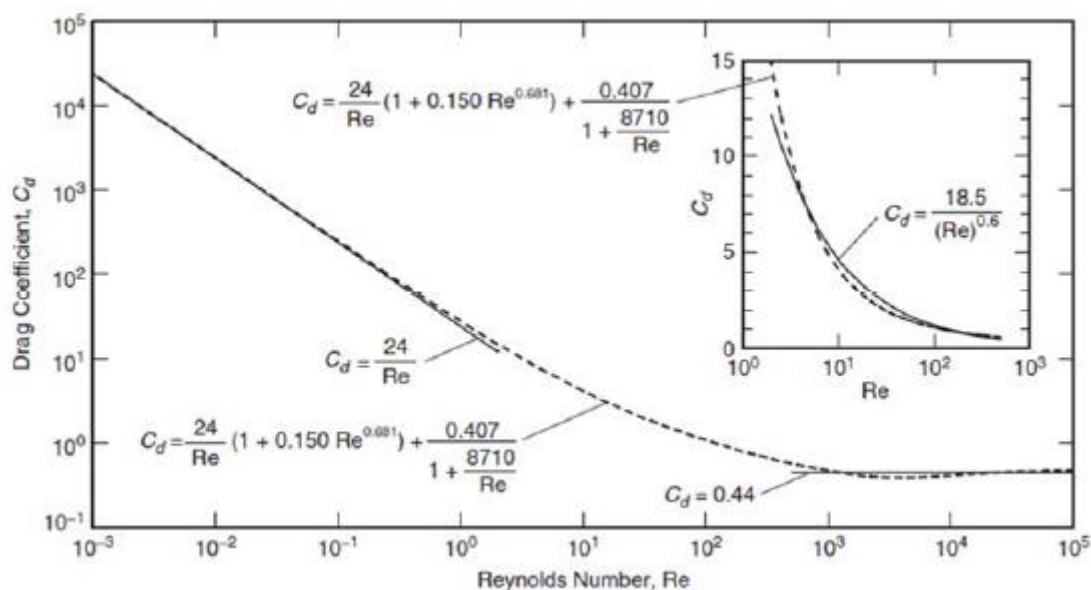
$$F_r = F_g - F_u = C_D A_p \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

gdje je:

C_D - faktor otpora

A_p - projicirana površina čestice

Faktor otpora C_D određuje se eksperimentalno, u ovisnosti o području strujanja. Područje strujanja određeno je Reynoldsovim brojem.



Slika 4. Faktor otpora u ovisnosti o Reynoldsovom broju [1]

Tako dobivenim parametrima, jednostavno je odrediti brzinu taloženja. Uređaji u kojima se proces taloženja (sedimentacije) provodi nazivaju se taložnici ili sedimentatori.

2.1.1. Taložnici

Taložnici ili sedimentatori su uređaji u kojima se odvajaju čestice čvrstih tvari uslijed razlike u gustoći između njih i tekućine. Aktivnu silu za provedbu procesa odvajanja, tj. taloženja čestica, uvjetuje gravitacija. U najviše slučaja, npr. u obradi otpadnih voda, promatra se odvajanje

čvrstih čestica iz suspenzije. Osim sile gravitacije, proces taloženja pospješuju i razni kemijski spojevi koji se nazivaju koagulanti i flokulanti. Odvajanje čestica može se odvijati iz određene količine suspenzije (šaržni postupak) ili kontinuiranim polaganim protokom suspenzije (kontinuirani postupak), u posudama, komorama ili bazenima. Neovisno o postupku, svaki taložnik se sastoji od uređaja za dovod suspenzije, odvod izbistrene kapljevine te ispust taloga. U osnovi, taložnici mogu biti izvedeni s horizontalnim ili vertikalnim protjecanjem suspenzije, ovisno o pojedinom slučaju.

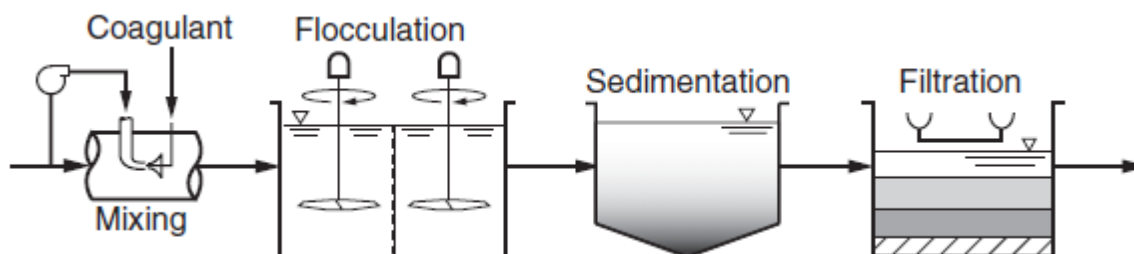
2.2. Filtracija

Filtracija je proces separacije suspendiranih tvari od tekućine koristeći porozni medij ili filter. Suspendirane tvari zadržavaju se na filteru, a tekućina smanjene koncentracije suspendiranih tvari (filtrat) izlazi iz filtra.

S obzirom na predobradu filtracija se može klasificirati na sljedeći način [1]:

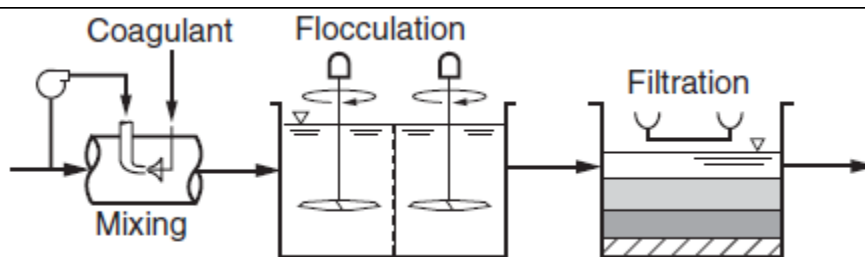
- konvencionalna filtracija,
- izravna filtracija,
- kontaktna (*In-line*) filtracija.

Konvencionalna filtracija je ujedno najčešći filtracijski sustav te je prikladan za površinske vode vrlo visoke i varijabilne mutnoće.



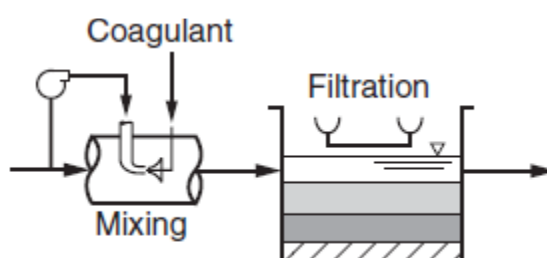
Slika 5. Konvencionalna filtracija [1]

Izravna filtracija je prikladna za jezerske vode s mutnoćom < 15 NTU (engl. *Nephelometric Turbidity Units*).



Slika 6. Izravna filtracija [1]

Kontaktna filtracija zahtjeva površinsku vodu visoke kvalitete s mutnoćom < 10 NTU.



Slika 7. Kontaktna (*In-line*) filtracija [1]

Filtracija uključuje nekoliko procesa, odnosno počiva na nekoliko efekata, a to su na prvom mjestu mehaničko zadržavanje i adsorpcijski efekt. Mehaničko zadržavanje odnosi se na efekt prosijavanja gdje veće čestice ostaju zadržane na filtracijskim materijalima. Adsorpcijski efekt se odnosi na stvaranje fizikalnih veza između čestice nečistoća i filtracijskog materijala. Nakon zasićenja filtra, filtracija se prekida i pokreće se postupak regeneracije ili pranja filtracijske ispune. Postupak se provodi u određenim sekvencama koristeći vodu i zrak.

2.2.1. Filtarska sredstva

Kao filtarska sredstva koriste se: propusne pregrade od papira i raznih tkanina, plastične folije, porozne ploče, različito tkane mreže od metala, slojevi zrnatih čestica, razni standardizirani umetci i talog koji se stvara pri filtraciji. Pritom se filtarska sredstva mogu koristiti na više načina [6]:

- Čestice se zaustavljaju na površini pregrade i stvaraju kompaktni sloj taloga koji postaje filtarsko sredstvo. Stvoreni sloj taloga naziva se „kolač“, a postupak se naziva filtracija kroz kolač. U kolaču se nalaze uski međuprostori, pa se kod protoka filtrata u njima zadržavaju i sitne čestice koje su prošle kroz otvore pregrade. Kod tog postupka stalno raste gustoća i debljina kolača.
- Čestice se zaustavljaju i talože po dubini filtarskog sredstva, što je slučaj npr. kad je filtarsko sredstvo sloj zrnatih čestica. Postupak se naziva dubinska filtracija, kod koje debljina i gustoća taloga stalno raste unutar filtarskog sredstva. Smanjenje propusnih

međuprostora (pora) u toku procesa dovodi do odvajanja i sitnijih čestica od veličine polupropusnih otvora filtarskog sredstva u čistom stanju.

- Čestice se odvajaju isključivo pomoću propusne pregrade. Postupak se naziva filtracija kroz sito, a veličina odvojenih čestica ovisi isključivo o veličini otvora na pregradi.

2.2.2. *Filtracijski uređaji*

Vrste filtracijskih uređaja koji se koriste u pročišćavanju vode dijele se na dvije skupine [1]:

1. Filtri s granuliranim filtracijskim materijalom
 - tlačni višeslojni filtri i
 - gravitacijski višeslojni filtri
2. Membranski filtri
 - mikrofiltracija,
 - ultrafiltracija,
 - nanofiltracija,
 - reverzna osmoza,

Parametri filtracijskih uređaja su:

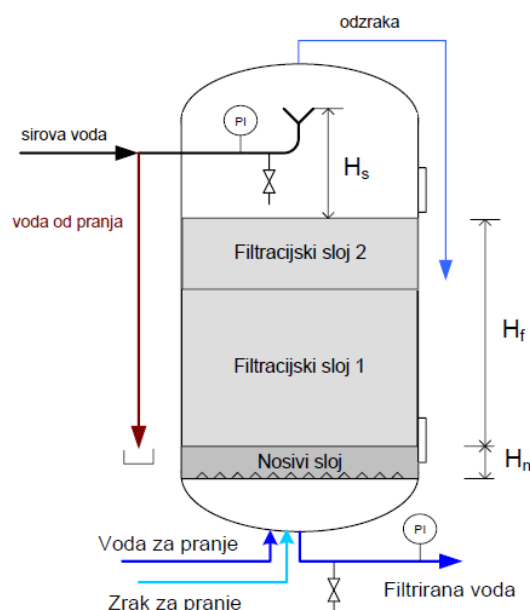
- površina filtra A [m^2],
- brzina filtracije v [m/h],
- kapacitet filtra Q [m^3/h],
- pad tlaka Δp [Pa],
- kvaliteta efluenta [NTU , mg/L],
- radni period filtra τ [h],
- trajnost filtarskog uložka [h] i
- operativni troškovi [kWh/m^3 , EUR/m^3]

2.2.2.1. *Filtri s granuliranim filtracijskim materijalom*

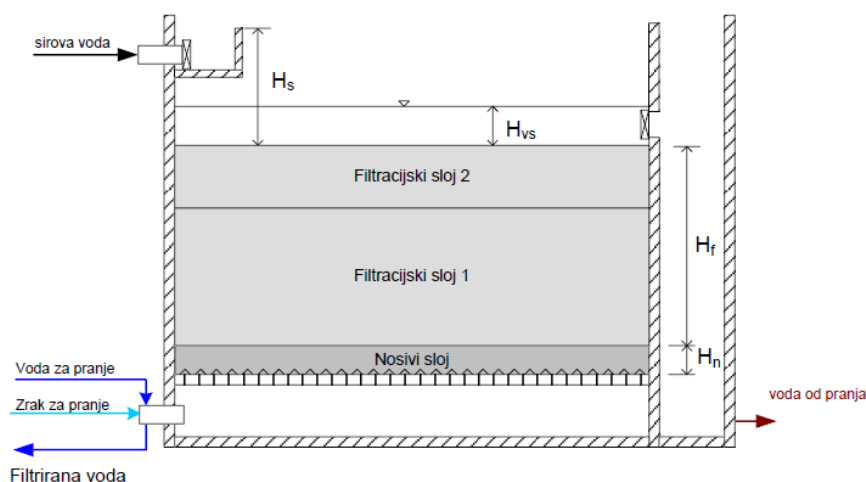
Filtracija s granuliranim materijalom je proces u kojem se uklanjaju suspendirane čestice ili neke koloidne disperzije, npr. uklanjanje suspendiranih čestica nakon sedimentacije. Općenito, smanjuje mutnoću uklanjajući čestice raznih veličina, od onih najkrupnijih do sitnih čestica veličine $10 \mu m$. Također, ovaj proces služi kao zaštita membranskih elemenata u kasnijim obradama reverznom osmozom ili nanofiltracijom. Granulirani medij se obično sastoji od slojeva antracita ($0,8 - 1,2$ mm), kvarcnog pijeska ($0,5 - 0,8$ mm), fino mrvljenog granata ($0,4 - 0,6$ mm) i magnetita ($0,3 - 0,4$ mm). Gornji sloj se sastoji od najlakšeg granuliranog medija, a najteži i najfiniji materijal je pri dnu. Princip filtracije počiva na tome da se veće čestice

odvajaju u gornjim slojevima, a manje čestice pri dnu granularanog materijala. Dakako, granularni materijal je smješten u cilindričnom spremniku. Obično je smjer kretanja vode odozgo prema dolje prilikom pročišćavanja, iako to ne mora biti slučaj. Iskustveni podaci pokazuju da je u filtru s jednim granularnim materijalom brzina filtracije 7 – 12 m/h, dok je brzina filtracije 14 – 20 m/h kod filtara s više granularnih materijala. S obzirom na to da se suspendirane čestice nakupljaju na granularnom mediju prilikom dugotrajnog korištenja, potrebno je u svaki ovakav sustav ugraditi i sustav za protupranje (engl. *backwash*) kako bi se materijal regenerirao. Uobičajeno je da se pristupa protupranju kada vrijednost pada tlaka Δp poraste na vrijednost 1 bar.

Jedina i osnovna razlika između tlačnih i gravitacijskih filtara je u načinu izvedbe. Kod tlačnih filtara granularni materijal se nalazi u zatvorenoj cilindričnoj posudi gdje voda za pročišćavanje ulazi pod određenim tlakom. S druge strane, gravitacijski filtri, kao što i sam naziv kaže, koriste gravitaciju za provođenje vode kroz granularni materijal pod atmosferskim tlakom. Razlika je u tome što se s tlačnim filtrima mogu postići veće brzine strujanja, a time i veće količine pročišćene vode [9].



Slika 8. Tlačni filtar [1]



Slika 9. Gravitacijski filtar [1]

2.2.2.2. Membranski filtri

Membrana je barijera koja uz definiranu selektivnost separira, odnosno sprječava prolaz česticama i otopljenim tvarima. Pritom postoje različiti mehanizmi zadržavanja čestica i otopljenih tvari:

- Separacija prosijavanjem je mehanizam pri kojem se koriste porozne membrane različitih struktura, a temelji se na pročišćavanju uslijed razlike između dimenzija pora i veličine čestica. Postupci koji koriste ovaj mehanizam su mikrofiltracija i ultrafiltracija. Njima se uklanjaju mutnoća, suspendirane čestice, flokule, bakterije i virusi.
- Drugi mehanizam podrazumijeva separaciju uslijed razlike u topljivosti i difuzivnosti gdje se koriste guste neporozne membrane bez većih pora. Reverzna osmoza i nanofiltracija spadaju u ovu grupu mehanizama. Dok RO membrane mogu separirati gotovo sve otopljene soli, NF membrane imaju manji stupanj separacije za manje molekule i ione.
- Separacija uslijed razlike u naboju čestica, na temelju naboja pojedinih membranskih materijala. Često NF membrane posjeduju naboj pa su dvovalentni ioni (kalcij, magnezij i sulfati) preferencijalno separirani [1].

Tablica 3. Klasifikacija membranskih procesa u obradi vode [7]

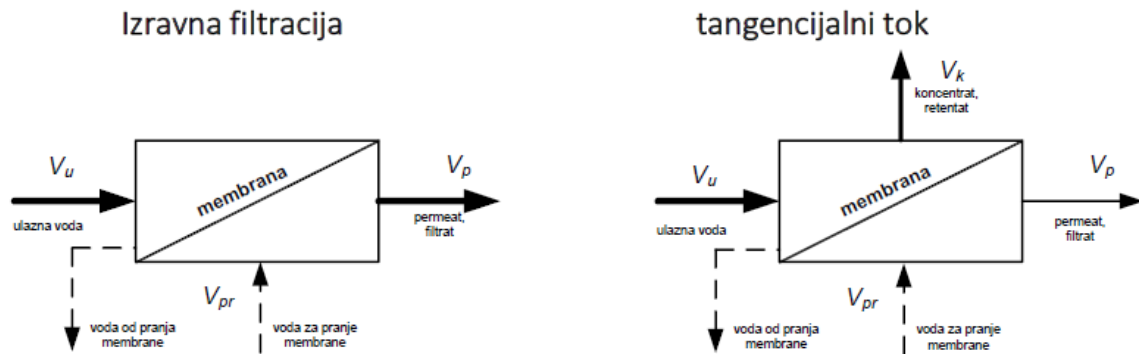
| Proces | Veličina pora; molekularna masa | Tlak, bar | Tip membrane | Prosječna permeabilnost, $L m^{-2} h^{-1} bar^{-1}$ |
|--------------------------|---------------------------------|-----------|-------------------------------------|---|
| Mikrofiltracija | 0,05 – 10 μm | 1 – 3 | Porozna, simetrična ili asimetrična | 500 |
| Ultrafiltracija | 0,001-0,05 μm | 2 – 5 | Mikroporozna, asimetrična | 150 |
| Nanofiltracija | < 2 nm | 5 – 15 | Porozna, kompozitni tanki film | 10 – 20 |
| Reverzna osmoza | 0,5 nm | 15 – 75 | Polupropusna, kompozitni tanki film | 5 – 10 |
| Elektrodijaliza | < 200 Da | - | Gel s nabojem | |
| Elektrodeionizacija | < 200 Da | - | Gel s nabojem | |
| Membransko otplinjavanje | 500-1000 | Vakuum | Porozna, simetrična | - |

Najvažniji parametri membranskog procesa su [1]:

- fluks ili specifični protok permeata kroz membranu, $J_P [L m^{-2} s^{-1}]$
- permeabilnost (specifična produktivnost) membrane, $L_P [L m^{-2} s^{-1} bar^{-1}]$
- transmembranski tlak membrane koji predstavlja pad tlaka utrošen za transport filtrata/permeata kroz membranu, $TMP [bar]$

Načelno, načini rada membrane mogu se podijeliti na dva procesa:

1. Izravna filtracija, odnosno primjena membrane bez formiranja toka koncentrata.
2. Tangencijalni tok („*Cross flow*“), odnosno primjena membrane uz formiranje toka koncentrata.



Slika 10. Princip rada membranske filtracije [1]

Za ocjenu kvalitete odvajanja membrana primarno se koristi faktor konverzije Y :

$$Y = \frac{Q_p}{Q_u} \quad (2)$$

gdje je:

Q_p - protok permeata [m^3/h]

Q_u - protok ulazne zahvaćene vode [m^3/h]

Uz kontinuirane gubitke retentata (koncentrata), potrebno je u obzir uzeti i gubitke od pranja membrane. Izraz za faktor konverzije zahvaćene vode se tada izražava pomoću volumena, koji su nastali u jednom ciklusu rada membranskog sustava koji obuhvaća sve standardne operacije rada:

$$Y = \frac{V_p - (V_k + V_{pr})}{V_u} \quad (3)$$

gdje je:

V_u - volumen ulazne vode [m^3]

V_p - volumen permeata [m^3]

V_k - volumen koncentrata [m^3]

Konačno, uspješnost separacije membranskog procesa proizlazi iz ostvarene razlike u koncentraciji promatrane tvari.

$$R = \frac{c_u - c_p}{c_u} \cdot 100 \quad (4)$$

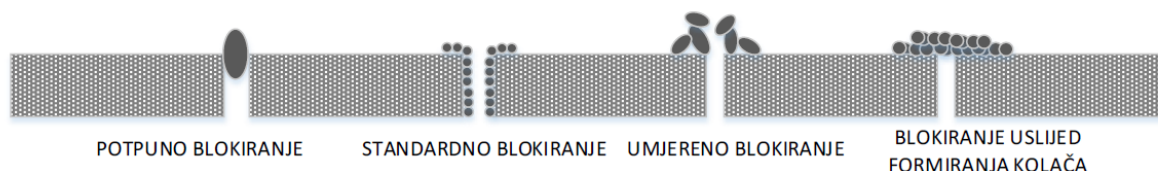
gdje je:

R - efikasnost separacije ili uklanjanja, faktor separacije [%]

c_p - koncentracija tvari u permeatu [mg L^{-1}]

c_u - koncentracija tvari u ulaznoj vodi [mg L^{-1}]

Nakon nekog vremena u pogonu, membrane će se zasititi suspendiranim tvarima što će rezultirati smanjenjem permeabilnosti i narušavanjem inicijalnih radnih karakteristika. Iz tog razloga, potrebno je provesti odgovarajuće postupke regeneracije membrana kako bi se osigurao njihov kontinuiran rad.



Slika 11. Oblici blokiranja pora membrana [1]

Regeneracija, ili obnova početnih svojstava protoka i separacije membrane provodi se hidrauličkim ili kemijski potpomognutim pranjem. Hidraulički način podrazumijeva protustrujno pranje filtratom, nekad uz prethodno ispiranje tlačne strane sirovom vodom. Kemijski potpomognuto pranje kombinira protustrujno pranje i kemijsko otapanje tvari koje uzrokuju blokiranje pora na membrani. Obično su to postupci kemijski pojačanog čišćenja CEB (engl. *Chemically Enhanced Backwash*) i CIP (engl. *Clean in Place*). CEB postupak se provodi nakon mehaničkog pranja filtratom uvođenjem kemijskog sredstva za čišćenje tako da se postigne željena pH vrijednost. Kemijsko sredstvo se u membranu uvodi pomoću pumpe za protupranje. Nakon što se kemijsko sredstvo u odabranoj koncentraciji uvede u membranski element, ostavlja se vrijeme za reakciju (otapanje, oksidacija) koja traje od 10 do 30 minuta. Nakon toga se ponovno obavlja protupranje filtratom, te je modul spreman za rad. Kemijska sredstva koja se pritom koriste su:

- kiselina - uklanjanje kamenca i drugih mineralnih nakupina (ugl. karbonati)
- lužina - uklanjanje bioobraštaja i organskih nakupina
- hipoklorit - uklanjanje mikrobiološkog onečišćenja

CIP postupak se u pravilu izvodi samo iznimno, u slučaju kad se propustilo napraviti pravodobni CEB i kod nemarnog upravljanja uređajem. Za ovaj postupak nužna je ugradnja uređaja koji uključuje pumpu za recirkulaciju sredstva za pranje, spremnik s grijačem i spojne elemente. Za potrebe pranja priprema se veća količina sredstava koja se cirkuliraju preko membrane.

2.2.2.3. Mikrofiltracija

Membrane koje se koriste u procesu mikrofiltracije imaju pore nazivnih dimenzija između 0,1 i 1,0 μm . Često se koristi kao filter za poliranje kvalitete s vrećastim ili kartušnim filterima. Obično se izvodi u obliku tangencijalnog toka pri relativno niskim vrijednostima transmembranskog tlaka membrane (< 4 bar) zbog čega se veliko područje primjene odnosi na vakuumske membranske postupke. Membrana je uronjena u medij koji se filtrira, a pumpom se izvlači filtrat kao produktna voda. Parametri koji su ključni za izbor vrećastih filtera su [7]:

- traženi stupanj uklanjanja za pojedine veličine čestica
- dozvoljeni pad tlaka
- radna temperatura
- radni medij



Slika 12. Vrećasti filtri [9]

2.2.2.4. Ultrafiltracija

Veličina pora na membranama koje se koriste u procesu ultrafiltracije kreću se između vrijednosti 0,001 i 0,05 μm . Koristi se za bistrenje vode (uklanjanje mutnoće), separaciju koloida, separaciju virusa i bakterija te separaciju proteina i drugih većih organskih molekula. Najčešći materijal UF i MF membrana su polimeri i to polietersulfon (PES), poliviniliden fluorid (PVDF) te polietilen (PEHD). Za posebne namjene koriste se keramičke membrane. Za potrebe prerade vode najčešće se koriste u obliku šupljih vlakana različitog unutarnjeg promjera. Uobičajeni broj takvih vlakana u membranskom modulu može biti i preko 10 000.



Slika 13. Uređaj za ultrafiltraciju [10]

2.2.2.5. Nanofiltracija

Nazivne veličine pora membrana u procesu nanofiltracije kreću se ispod 2 nm. Materijal TFC („*Thin Film Composite*“) membrana je uglavnom poliamid (PA). S obzirom na sposobnost selektivnog uklanjanja organskih tvari male mase i dvovalentnih komponenata, ovaj postupak je prikladniji za pročišćavanje otpadnih voda od ultrafiltracije i reverzne osmoze (npr. u procesu uklanjanja teških metala, odvajanju boja i obojenih komponenti u tekstilnoj industriji). Ispod su navedene karakteristike izdvajanja tvari iz vode u usporedbi s reverznom osmozom [7]:

- monovalentni ioni (Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^-): RO > 98%; NF > 50%
- dvovalentni ioni (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , CO_3^{2-}): RO > 99%; NF > 95%
- otopljene tvari ($m > 100$ Da): RO > 90%; NF > 50%
- otopljene tvari ($m < 100$ Da): RO > 0-90%; NF > 0-50%
- bakterije, virusi: RO > 99%; NF < 99%

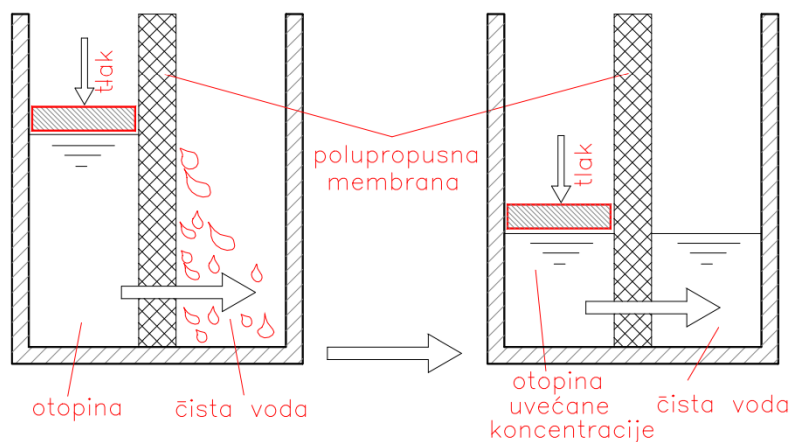
Nanofiltracija se ponajviše primjenjuje za umekšavanje vode, uklanjanje organskih komponenata u bojama i trihalometanskih prekursora. U obradi vode, najveća primjena nanofiltracije je u uklanjanju ukupnog organskog ugljika (TOC) s dodatnim umekšavanjem vode. Time se ujedno održavaju minimalne razine tvrdoće što pozitivno utječe na organoleptička svojstva i očuvanje sustava cjevovoda.

2.2.2.6. Reverzna osmoza

Reverzna osmoza je tehnološki postupak koji se zasniva na fizikalnoj separaciji otopljenih tvari u vodi pomoću polupropusne membrane. Naziv ove tehnologije polazi od osmoze, odnosno spontane pojave toka vode kroz polupropusnu membranu s težnjom izjednačavanja

koncentracije tvari tj. izjednačavanja kemijskog potencijala otopina s obje strane membrane.

[1]



Slika 14. Reverzna osmoza [1]

Efektivni protok vode kroz polupropusnu membranu prikazan je sljedećim izrazom:

$$J_w = A(\Delta p - \Delta \pi) \quad (5)$$

gdje je:

J_w - volumetrijski fluks vode [$\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]

A - koeficijent permeabilnosti za vodu [$\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{bar}^{-1}$]

Δp - razlika tlaka na membrani [bar]

$\Delta \pi$ - razlika osmotskih tlakova na membrani [bar]

Vrijednost koeficijenta A se kod RO membrana kreće između vrijednosti 3×10^{-3} i $6 \times 10^{-5} \text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{bar}^{-1}$.

Osmotski tlak ovisi o koncentraciji otopine, temperaturi otopine i vrsti prisutnih iona. Za idealne otopine niskih koncentracija otopljenih tvari (primjenjivo kod RO) osmotski tlak se procjenjuje van't Hoffovim izrazom:

$$\pi = v_i c_i R T \quad (6)$$

gdje je:

π - osmotski tlak [bar]

v_i - broj formiranih iona nakon disocijacije (npr. 2 za NaCl, 3 za BaCl₂)

c_i - molarna koncentracija otopine [kmol m^{-3}]

R - opća plinska konstanta [$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$]

T - termodinamička temperatura [K]

Fluks otopljene tvari dan je sljedećim izrazom:

$$J_s = B(\Delta C_s) \quad (7)$$

gdje je:

J_s - fluks otopljene tvari [$\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$]

B - koeficijent permeabilnosti otopljene tvari [$\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{bar}^{-1}$]

ΔC_s - razlika koncentracija otopljene tvari na membrani [kmol m^{-3}]

Vrijednost koeficijenta permeabilnosti B kreće se u rasponu od 5×10^{-3} do $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$ za RO membrane.

RO membrane dizajnirane su za različite vrste obrade vode. Na primjer, RO membrane za morsku vodu imaju stupanj separacije veći od 99,6%, a za bočatu vodu nešto manju od 99%.

Svojstva separacije općenito se karakteriziraju iz sljedećeg [7]:

- polivalentni ioni (Ca^{2+} , Mg^{2+} , ...) imaju već stupanj separacije od monovalentnih iona (Na^+ , ...).
- nedisocirane ili slabo disocirane tvari imaju niže stupnjeve separacije (npr. silicij)
- kiseline i lužine se slabije separiraju nego njihove soli
- separacija slabih kiselina i lužina uglavnom ovisi o pH vrijednosti, odnosno kada su ionizirane, stupanj separacije je visok i obratno
- Na^+ se bolje separira u spoju Na_2SO_4 nego u spoju NaCl , a isto vrijedi i za jednakovrijedne ione
- separacija nitrata je znatno niža od nekih drugih jednovalentnih iona.

Općenito, proces reverzne osmoze primjenjuje se u sljedeće svrhe [1]:

- desalinizacija slane (morske i bočate) vode
- demineralizacija vode (podzemne i površinske vode)
- uklanjanje specifičnih onečišćenja iz otpadnih voda
- sustavi za recikliranje
- sustavi za rekuperiranje korisnih materijala iz otpadne vode

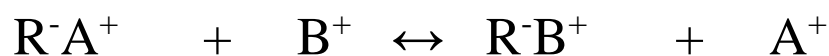
2.3. Ionska izmjena

Ionska izmjena je proces reverzibilne zamjene iona između čvrste i kapljevite faze. Čvrsta faza se naziva ionskim izmjenjivačem te je netopiva u kapljevitoj fazi. U tehnologiji obrade vode prvenstveno se koristi za umekšavanje vode i demineralizaciju. U komunalnim sustavima se uglavnom upotrebljava za uklanjanje tvrdoće te uklanjanje nitrata, barija, arsena, perklorata i kromata. U industriji se koristi za pripremu kotlovske vode te ultračiste vode za farmaceutsku industriju i industriju poluvodiča.

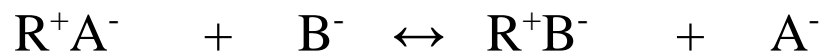
2.3.1. Vrste ionske izmjene

Izmjena iona odvija se na aktivnim skupinama, a prema vrsti iona koji se izmjenjuju, dijeli se na kationske i anionske.

Kationska:



i anionska:



gdje je:

R - izmjenjivač

A i B - ioni za izmjenu

Ionski izmjenjivač (ionska masa) je materijal koji ima svojstvo reverzibilne izmjene iona u vodenim otopinama. Njihova svojstva karakteriziraju se na sljedeći način [1]:

- hidrofилna struktura pravilne i reproducibilne forme
- kontroliran i učinkovit kapacitet izmjene
- reverzibilna i brza izmjena iona
- kemijska stabilnost s obzirom na elektrolitne otopine
- fizikalna stabilnost s obzirom na mehaničku čvrstoću i otpornost prema mrvljenju (eroziji, habanju)
- termička stabilnost
- odgovarajuća te ujednačena veličina zrnja
- izražena selektivnost – anionski/kationski izmjenjivač

2.3.2. Proračun volumena ionske mase

Volumen ionske mase V_m kod primjerice neutralne kationske izmjene, može se odrediti iz sljedećeg izraza:

$$V_m = \frac{Q \cdot UT \cdot \tau}{K_k} \quad (8)$$

gdje je:

Q - kapacitet uređaja [m^3/h]

UT - ukupna tvrdoća [$mval/L$]

τ - vrijeme između dvije regeneracije

K_k - korisni kapacitet [val/L]

Na korisni kapacitet jako kisele kationske mase u Na formi utječe ukupna tvrdoća vode, temperatura, udio natrija u sadržaju kationa, dozvoljena tvrdoća na kraju radnog ciklusa, brzina strujanja vode kroz ionski izmjenjivači visina sloja ionskog izmjenjivača.

2.3.3. Vrste ionskih izmjenjivača

Ionski izmjenjivači se načelno mogu podijeliti na četiri vrste. Kationski izmjenjivači se dijele na slabo kisele (K_1) i jako kisele (K_2), a anionski na slabo bazne (A_1) i jako bazne (A_2).

2.3.3.1. Slabo kisela kationska izmjena (K_1)

Slabo kisela kationska izmjena se koristi za dekarbonizaciju fizikalno čistih (bistrih) voda. Ova izmjena ovisi o pH vode. To je vidljivo iz činjenice da se pK_a vrijednosti slabo kisele kationske mase kreću između 4 i 5, odnosno za vrijednosti $pH < 6$ masa ima veći afinitet prema vodikovim ionima i neće doći do izmjene s drugim kationima. Ovim se postupkom mogu dekarbonizirati sirove vode koje sadrže natrijev bikarbonat, NaHCO_3 čime se dobije voda vrlo male karbonatne tvrdoće i to u granicama između 0,04 i 0,2 mval/L. Volumen ionske mase filtra se dobiva iz:

$$V_m = \frac{Q \cdot m_{alk} \cdot \tau}{K_k} \quad (9)$$

gdje je:

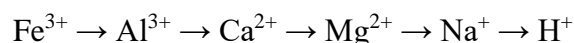
K_k - korisni kapacitet [val/L]

m_{alk} - „m“ alkalitet vode [val/L]

Korisni kapacitet funkcija je više varijabli, ali se kreće između vrijednosti 0,8 i 2,5 val/L.

2.3.3.2. Jako kisela kationska izmjena (K_2)

Aktivna skupina ovog izmjenjivača veće je kiselosti od HCl, HNO_3 i H_2SO_4 . Ova ionska masa ima vrlo nisku vrijednost $pK_a (< 0)$ što znači da ima mali afinitet prema vodikovom ionu i lako ga zamjenjuje za druge katione. Drugim riječima, odstranjuju se svi kationi: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , NH_4^+ . Dobiva se voda s pH vrijednošću nižom od 3,8 tj. dekationirana voda. Afinitet kationa prema ionskoj masi ovisi o valentnosti i atomskoj masi kationa. Redoslijed afiniteta:



Volumen ionske mase dobiva se iz sljedećeg izraza:

$$V_m = \frac{Q \cdot BT \cdot \tau}{K_k} \quad (10)$$

gdje je:

K_k - korisni kapacitet [val/L]

BT - bazna tvrdoća (suma kationa) [val/L]

Korisni kapacitet kreće se između vrijednosti 0,8 i 2 mval/L. Regeneracija se provodi primjenom klorovodične kiseline HCl (4–10%) ili pomoću sumporne kiseline H₂SO₄ (2–4%).

2.3.3.3. Slabo bazna anionska izmjena (A_1)

Ovi izmjenjivači iz vode odstranjuju samo jake kiseline procesom adicije: HCl, H₂SO₄, HNO₃.

Volumen ionske mase dobiva se iz sljedećeg izraza:

$$V_m = \frac{Q \cdot AT_1 \cdot \tau}{K_k} \quad (11)$$

gdje je:

K_k - korisni kapacitet [val/L]

AT_1 - „m“ alkalitet; anioni mineralnih kiselina (SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻, ...) [val/L]

Korisni kapacitet kreće se između vrijednosti 0,8 i 1,5 mval/L. Regeneracija zasićene ionske mase najčešće se provodi pomoću natrijeve lužine NaOH u koncentraciji 2-4%. Ponekad se koristi i Na₂CO₃ (5%). Slabo bazni anionski izmjenjivači mogu se koristiti i za uklanjanje organskih tvari iz vode koje posjeduju određeni naboj (huminske tvari). S obzirom na to da se radi o makroporoznim ionskim masama (veličine pora od 100 do 300 Å), organske tvari se prilikom regeneracije vrlo uspješno uklanjaju te se rijetko događa nepovratno onečišćenje ionskog izmjenjivača.

2.3.3.4. Jako bazna anionska izmjena (A_2)

To su jake baze (reda veličine KOH), imaju kvartarnu amonijevu skupinu pa iz vode mogu odstraniti jake i slabe kiseline. Volumen ionske mase dobiva se iz sljedećeg izraza:

$$V_m = \frac{Q \cdot AT_2 \cdot \tau}{K_k} \quad (12)$$

gdje je:

K_k - korisni kapacitet [val/L]

AT - ukupna anionska tvrdoća [val/L]

Ukupna anionska tvrdoća dobiva se iz sljedećeg izraza:

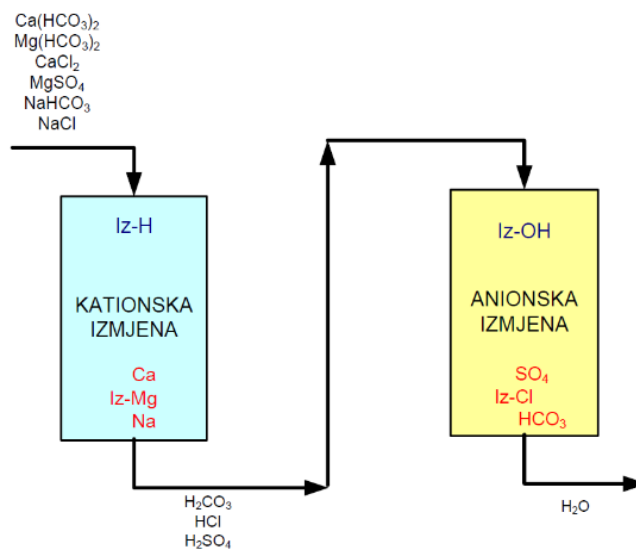
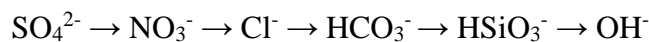
$$AT = AT_1 + AT_2 \quad (13)$$

gdje je:

AT_1 - suma sadržaja Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻

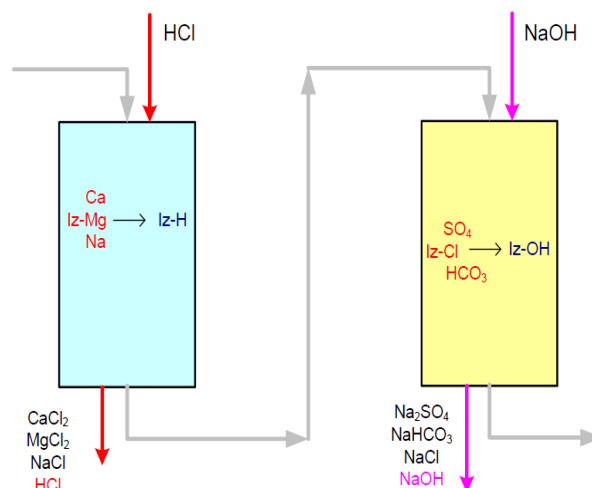
AT₂ - sadržaj CO₂ i SiO₂

Pritom se regeneracija provodi pomoću natrijeve lužine NaOH (2-4%). Afinitet aniona prema ionskoj masi ovisi o valentnosti aniona i molekularnoj težini. Tako je redosljed afiniteta:



Slika 15. Rad ionskih izmjenjivača[1]

Tijekom rada ionskih filtara u određenom trenutku doći će do zasićenja te neće više moći tako efektivno raditi kao u prvotnom stanju. Stoga je potrebno provesti regeneraciju ovih uređaja. Načelno, sustavi regeneracije mogu biti istosmjerni i protusmjerni. Kod istosmjerne regeneracije otopina za regeneraciju struji u istom smjeru kao i voda koja se obrađuje postupkom ionske izmjene. Kod protusmjerne, otopina za regeneraciju struji u obrnutom smjeru od vode koja se obrađuje postupkom ionske izmjene.



Slika 16. Regeneracija ionskih izmjenjivača [1]

2.3.3.5. Ionski izmjenjivači s miješanim filtrom

Razvoj ionskih izmjenjivača s miješanim filtrom (*engl. Mixed-bed*) smatra se najbitnijim doprinosom u tehnologiji ionske izmjene. Ovaj tip ionskog izmjenjivača sadrži uniformno raspoređene ionske mase jako kiselog i jako baznog ionskog izmjenjivača u H⁺ i OH⁻ formi. Obično dolaze u omjeru 60:40. Ovdje se demineralizacija odvija istovremenom izmjenom kationa i aniona u jednoj tlačnoj posudi. Svaka granula ionske mase anionskog izmjenjivača brzo reagira s nastalom kiselinom na ionskoj masi kationskog dijela izmjenjivača, uklanjajući tako kiseline čim se formiraju. Time se ujedno uklanja potreba za dvije tlačne posude od kojih bi svaka sadržavala svoju ionsku masu. Ključ uspješnog procesa ionske izmjene u ovakvoj tehnologiji je u odvajanju ionskih masa prilikom regeneracije kako bi se mogle regenerirati odvojeno. Obično se to postiže rahljenjem mase prije uvođenja kemikalije za regeneraciju što se nekada pospješuje umetanjem inertne ionske mase. Iznos gustoće inertne ionske mase je između kationske i anionske, stoga se uspješno koristi kao sredstvo za razdvajanje. Ukoliko je riječ o istosmjernoj regeneraciji, onda se obično provodi sljedećim postupcima [8]:

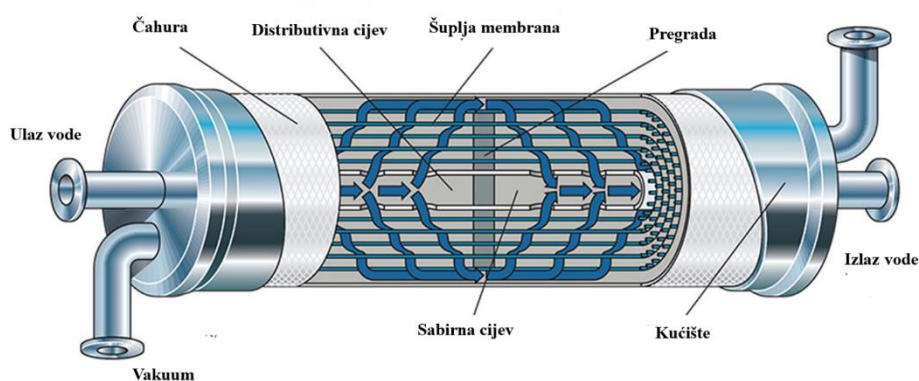
1. Rahljenje mase se postiže prolaskom vode u suprotnom smjeru od onog prilikom rada ionskog izmjenjivača brzinom 4 – 15 m/h u trajanju od 10 do 20 min. Time se uklanjaju zaostale suspendirane čestice, smanjuje se stlačenost ionske mase te se omogućuje izlaz zarobljenim plinovima.
2. Kemijskom regeneracijom se ionska masa vraća u početno ionsko stanje. Ovo se postiže uvođenjem vodenih otopina jakih kiselina, npr. H₂SO₄ ili HCl, za kationski dio ionske mase, odnosno vodene otopine NaOH za anionski dio ionske mase miješanog filtra.

Brzina strujanja vodenih otopina regeneranata je dovoljno mala da se omogući difuzija kemikalija u ionsku masu i time osigura izmjena odgovarajućih iona.

3. Ispiranje je zadnji proces koji se odvija u dva dijela. Prvi korak je sporo ispiranje kojim se osigurava razdvojenost anionskog i kationskog dijela ionske mase. Drugi korak je brzo ispiranje koje se odvija pri velikim brzinama, obično u trajanju 10 min. Velik protok kod brzog ispiranja uklanja sve tragove vodene otopine regeneranta. Često se, uz ispiranje, koristi i komprimirani zrak kako bi se omogućio što bolji kontakt između regeneranta i ionske mase koja se regenerira te kako bi se spriječilo miješanje regeneriranog i zasićenog dijela ionske mase.

2.4. Membransko otplinjavanje

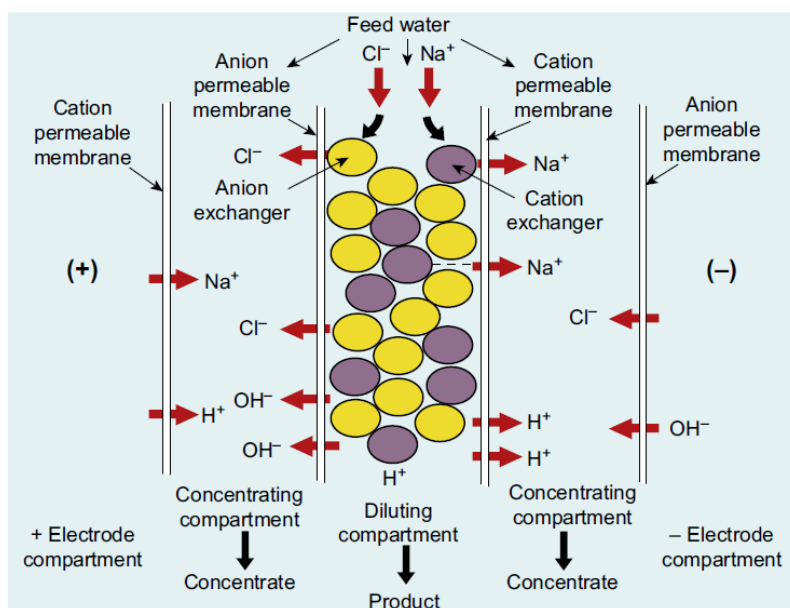
Otopljeni plinovi u ultračistoj vodi se sve češće uklanjaju tehnologijom membranskog otplinjavanja. Naime, električna provodnost ultračiste vode mora biti svedena na minimum, odnosno na propisanu minimalnu granicu od $0,055 \mu\text{S}/\text{cm}$, a prisutnost otopljenog ugljikova dioksida, CO_2 , je znatno povisuje. Kako bi se izbjeglo korištenje kemikalija za uklanjanje otopljenih plinova ili upotreba klasičnog termičkog otplinjavanja koje zahtjeva dodatno povisivanje temperature, prilazi se metodi otplinjavanja s membranom. Ovaj otplinjivač se sastoji od tlačne posude u koju je složeno mnoštvo šupljih vlakana koje su propusne za plinove. Budući da su vlakna hidrofobne membrane propusne za plin, omogućuje se uklanjanje plinova iz otopine u šuplju jezgru svakog vlakna. Protok vode je usmjeren radijalno na vlakna, što dodatno povećava kontakt.



Slika 17. Membranski otplinjivač [11]

2.5. Elektrodeionizacija u proizvodnji ultračiste vode

Elektrodeionizacija s ionskom masom često se koristi u proizvodnji ultračiste vode jer se tako može približno postići teorijska granica el. otpornosti od 18,3 M Ω cm uz manje troškove nego kod postizanja jednakovrijednih svojstava destilacijom. U kombinaciji s reverznom osmozom, može se postići konstantan protok ultra čiste vode el. otpornosti 18 M Ω cm s minimalnom mogućom potrošnjom kemijskih tvari za regeneraciju. Također, koncentracija CO₂ i SiO₂ se elektrodeionizacijom spušta na razinu od nekoliko $\mu\text{g/L}$, a jakih elektrolita čak na 10⁻² $\mu\text{g/L}$.



Slika 18. Shematski prikaz elektrodeionizacije [7]

Elektrodeionizacija je proces u kojem se koristi kombinacija ionske mase i membrana kako bi se uklonili svi ioni iz vode. Pritom nije potrebno koristiti kiseline ili baze za regeneraciju. U praksi, ovaj proces sastoji se od propuštanja otopine elektrolita kroz izmjenjivačku ionsku masu koja se nalazi između dvije ion selektivne membrane. Te dvije membrane dijele prostor u 3 odjeljka. Tipičan EDI uređaj sadrži kationske i anionske membrane, te pripadajuće elektrode (katoda i anoda) dok je prostor između njih namijenjen za protok vode. Kada se odjeljci podvrgnu strujnom polju (istosmjerna struja) elektrode počinju privlačiti ione u vodi. Odjeljci koji su omeđeni anionskom membranom okrenutom prema anodi (+) i kationskom membranom okrenutom prema katodi (-) otpuštaju ione te postaju razrijeđeni. Odjeljci omeđeni anionskom membranom okrenutom prema katodi i odjeljci omeđeni kationskom membranom okrenutom prema anodi zarobljavaju ione iz razrijeđenih odjeljaka čime im se povisuje koncentracija iona. U kontinuiranom EDI (*Continuous Electrodeionization*, CEDI) procesu, prostor koji se prazni ionima ispunjen je ionskom masom. Ionska masa ojačava transport tih iona iz predviđenih

odjeljaka te može poslužiti kao supstrat za elektrokemijske reakcije. U nižim dijelovima pročišćenog odjeljaka nastaje veliki električni potencijal koji cijepa molekule vode na H^+ i OH^- ione (elektroliza vode). Oni su u osnovi kisele i bazične prirode što znači da se ionska masa nakon zasićenja sama regenerira novonastalim H^+ i OH^- ionima te nije potrebna dodatna regeneracija. Najbitniji parametri EDI procesa koji određuju efikasnost EDI uređaja su jakost električne struje, brzina strujanja u odjeljcima, temperatura i ukupno otopljene tvari (TDS).

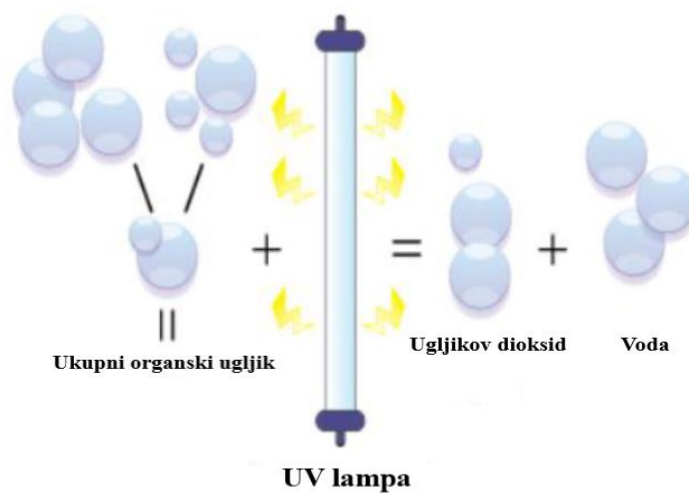


Slika 19. Uređaji za kontinuiranu elektrodeionizaciju [12]

2.6. UV oksidacija

Ultraljubičasto zračenje učinkovito je sredstvo za smanjenje ukupnog organskog ugljika (TOC). Smanjenje ukupnog organskog ugljika u vodi kritično je za industriju poluvodiča i farmaceutsku industriju te za obradu otpadnih voda. Oksidacija se postiže putem tri vrste reakcija koje pokreće UV zračenje koje uništava i/ili uklanja ukupni organski ugljik. Primarna UV/kemijska reakcija je proces oksidacije koji počinje kada visokoenergetske UV zrake valne duljine 185 nm razdvoje molekule vode, stvarajući pritom slobodne OH radikale. Radikali koje stvara vakuumski UV vrlo su reaktivni i lako se spajaju s drugim molekulama, kao što su molekule ugljikovodika koje čine ukupni organski ugljik. U reakciji OH radikala i niskomolekularnih organskih spojeva, kao konačni produkt nastaju molekule vode i ugljikova dioksida. Tako se koncentracija ukupnog organskog ugljika smanjuje i oksidacija je završena. Druga vrsta UV reakcije koja uzrokuje uklanjanje TOC-a je ona pri kojoj ultraljubičasti fotoni izravno razgrađuju organske molekule i na taj način pridonose uklanjanju ukupnog organskog

ugljika. Treću vrstu UV reakcije karakterizira ionizacija organskih molekula koje se naknadno mogu ukloniti deionizacijskim sustavom. Dodatna prednost korištenja UV zraka za smanjenje ukupnog organskog ugljika je da UV lampe također generiraju zrake valnih duljina od 254 nm i posljedično omogućuju visoku razinu smanjenja mikroba (dezinfekcija).



Slika 20. UV oksidacija [13]

3. PRORAČUN POSTROJENJA ZA PRIPREMU ULTRAČISTE VODE

U projektiranom postrojenju raspoloživa vodovodna pitka voda prolazi kroz nekoliko stupnjeva obrade kako bi se zadovoljili uvjeti za ultračistom vodom propisani normom ASTM D 5127 – 07. Voda na raspolaganju sljedećeg je kemijskog sastava:

Tablica 4. Kemijski sastav vodovodne pitke vode

| Parametar | Vrijednost | Mjerna jedinica |
|--------------------------|------------|-----------------|
| Temperatura | 14,5 | °C |
| Slobodni rezidualni klor | 0,26 | mg/L |
| Mutnoća | 0,18 | NTU |
| pH vrijednost | 7,31 | - |
| Ukupni organski ugljik | 0,62 | mg/L |
| Vodljivost | 784,4 | μS/cm |
| Kalij | 2,50 | mg/L |
| Natrij | 16,70 | mg/L |
| Magnezij | 24,20 | mg/L |
| Kalcij | 108,00 | mg/L |
| Karbonati | 0,608 | mg/L |
| Hidrogenkarbonati | 398,951 | mg/L |
| Nitrati | 21,20 | mg/L |
| Kloridi | 28,90 | mg/L |
| Fluoridi | 0,020 | mg/L |
| Sulfati | 21,80 | mg/L |
| Fosfati | 0,030 | mg/L |

Ovaj sastav vode dobiven je prema godišnjim osrednjenim podacima o kvaliteti vode na vodocrpilištu Zapruđe u gradu Zagrebu.

Kako bi se postigli traženi uvjeti kemijskog sastava ultračiste vode, vodovodna voda prolazi kroz obradu reverznom osmozom, nakon čega slijedi fino pročišćavanje u ionskom izmjenjivaču s miješanim filtrom. Između i nakon ova dva ključna stupnja obrade, nalazi se niz postupaka kojima se voda dodatno obrađuje kako bi se isporučio traženi kapacitet ultračiste

vode od 175 m³/h uz ispravan rad ugrađene opreme. Predviđen rad postrojenja je 16 sati, odnosno u dvije smjene. Preostalo vrijeme u danu služi za operacije regeneriranja i pranja opreme kako bi se u prvoj smjeni ponovno mogla koristiti bez poteškoća. Proračun postrojenja proveden je uz pomoć računalnog programa Wave (*Water Application Value Engine*) američke tvrtke DuPont. Korisnik ovog programa može, uz poznati sastav ulazne vode, jednostavno birati koje tehnologije obrade vode primjenjuje te pratiti dobivene parametre na kraju svakog procesa. Korištene tehnologije obrade vode u ovom projektu detaljno su opisane u sljedećim poglavljima



Slika 21. Početna stranica računalnog programa Wave

3.1. Primarna sekcija

3.1.1. Ionsko umekšavanje

Vodovodna voda je pročišćena do razine koja zadovoljava standarde o pitkoj vodi. Samim time nema potrebe za predobradom kao što bi bio slučaj kod snabdijevanja vodom direktno iz rijeke, jezera ili mora.

Prvi korak u pripremi ultračiste vode je ionsko umekšavanje u svrhu smanjenja njene tvrdoće. Ova tehnologija se koristi uglavnom s ciljem zaštite membrana u procesu reverzne osmoze. Naime, tvrdoća vode je definirana prisustvom kalcijevih i magnezijevih iona. Zbog velike koncentracije tih iona u ulaznoj vodi, u nekim dijelovima RO modula može nastati prezasićena vodena otopina te se nakon kristalizacije soli istalože na membrane. To ima za posljedicu

smanjenje fluksa permeata, povećanje transmembranskog tlaka te smanjenje učinkovitosti separacije zbog čega konačno, ukoliko se ne intervenira, može doći do havarije.

S obzirom na činjenicu da je riječ o ogromnom protoku vode, proračunom u računalnom programu utvrđena je raspodjela ukupnog protoka na četiri tlačne posude s ionskom masom. Upravo taj broj posuda omogućuje prikladan kontakt vode i ionske mase potreban za učinkovitu ionsku izmjenu te odgovarajući protok vode koji neće negativno utjecati na hidrauličke karakteristike procesa.

3.1.1.1. Volumen i visina ionske mase

Projektni ulazni protok Q_{ul} iznosi $243 \text{ m}^3/\text{h}$. To znači da će svaki ionski izmjenjivač obrađivati četiri puta manji volumni protok. Volumni protok kroz jednu posudu $Q_{ul,1}$ iznosi $60,75 \text{ m}^3/\text{h}$. Radi sigurnosti, u stanje pripravnosti se stavlja još jedan identičan sustav s četiri tlačne posude. U slučaju da dođe do nepredvidivih kvarova, jednostavnom prilagodbom se protok preusmjerava u novu posudu i postrojenje nastavlja s radom.

Tvrdoća ulazne vode može se odrediti prema sljedećem izrazu:

$$UT = CaT + MgT \quad (14)$$

gdje je UT ukupna tvrdoća, CaT kalcijeva tvrdoća i MgT magnezijeva tvrdoća.

Kalcijeva tvrdoća jednaka je:

$$CaT = \frac{c(\text{Ca}^{2+})}{E_t(\text{Ca}^{2+})} \quad (15)$$

gdje je $c(\text{Ca}^{2+})$ masena koncentracija kalcijevih iona u vodi te iznosi 108 mg/L , a $E_t(\text{Ca}^{2+})$ je ekvivalentna težina koja se računa prema sljedećem:

$$E_t(\text{Ca}^{2+}) = \frac{M(\text{Ca}^{2+})}{Z(\text{Ca}^{2+})} \quad (16)$$

gdje je $M(\text{Ca}^{2+})$ molarna masa kalcija koja iznosi $40,078 \text{ g/mol}$, a $Z(\text{Ca}^{2+})$ ionski naboj kalcija. Z je pozitivni cijeli broj čija vrijednost ovisi o kemijskom kontekstu. Pri računanju ekvivalentnih težina vrsta koje sudjeluju u reakcijama otapanja, odnosno taloženja, Z je jednak oksidacijskom broju iona, tj. ionskom naboju. U ovom slučaju iznosi 2 val/mol.

Magnezijeva tvrdoća računa se na isti način:

$$MgT = \frac{c(\text{Mg}^{2+})}{E_t(\text{Mg}^{2+})} \quad (17)$$

gdje je $c(\text{Mg}^{2+})$ masena koncentracija magnezijevih iona u vodi te iznosi $24,2 \text{ mg/L}$, a $E_t(\text{Mg}^{2+})$ je ekvivalentna težina koja se računa prema sljedećem:

$$E_t(\text{Mg}^{2+}) = \frac{M(\text{Mg}^{2+})}{Z(\text{Mg}^{2+})} \quad (18)$$

gdje je $M(\text{Mg}^{2+})$ molarna masa magnezija te iznosi 24,305 g/mol, a $Z(\text{Mg}^{2+})$ ionski naboj magnezija koji također iznosi 2 val/mol.

Kada je određena ukupna tvrdoća, pristupa se određivanju potrebnog volumena ionske mase. Odabrana ionska masa u ovom projektu za svrhu umekšavanja vode je Amberlite HPR1100 Na. To je jako kisela kationska ionska masa u Na formi. Primjenom izraza (8) određen je potrebni volumen ionske mase za umekšavanje vode volumnog protoka 60,75 m³/h uzimajući u obzir da je korisni kapacitet $K_k = 1,33$ val/L dobiven u računalnom programu Wave. Ako je vrijeme rada postrojenja $\tau = 16$ h, potrebni volumen ionske mase $V_{m,um}$ iznosi 5,4 m³.

Prema specifikacijama ionske mase Amberlite HPR1100 Na potrebno je zadovoljiti sljedeće parametre:

- visina ionske mase, $h_{im,um} = 700 - 2500$ mm,
- hidrauličko opterećenje, $v_{h,um} = 6 - 60$ BV/h,
- linearna brzina, $v_{lin,um} > 12$ m/h.

Odabrani promjer posude ionskog izmjenjivača je $d_{v,um} = 1700$ mm uz debljinu stijenke $s_{p,um} = 10$ mm čime su prema računalnom programu Wave zadovoljene hidrauličke karakteristike. Tada je unutarnji promjer posude:

$$d_{u,um} = d_{v,um} - 2 \cdot s_{p,um} \quad (19)$$

a iz čega slijedi da je površina posude:

$$A_{p,um} = \frac{d_{u,um}^2 \cdot \pi}{4} \quad (20)$$

Konačno, moguće je odrediti visinu ionske mase:

$$h_{m,um} = \frac{V_{m,um}}{A_{p,um}} \quad (21)$$

Hidrauličko opterećenje se računa prema sljedećem:

$$v_{h,um} = \frac{Q_{ul,1}}{V_{m,um}}, \quad (22)$$

a linearna brzina:

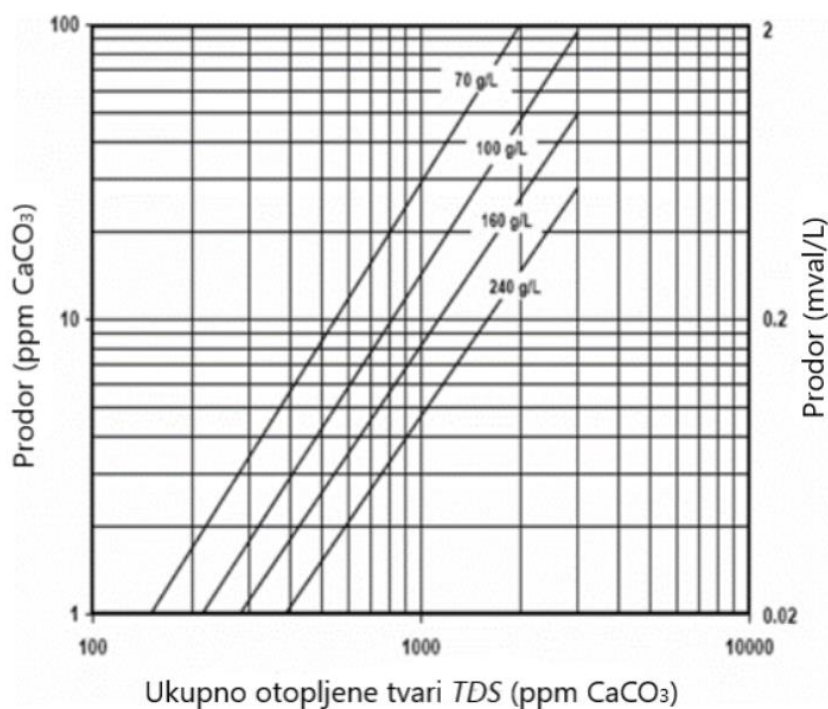
$$v_{lin,um} = \frac{Q_{ul,1}}{A_{p,um}} \quad (23)$$

Obično se uzima da je visina posude ionskog izmjenjivača dva puta veća od visine ionske mase kako bi se osigurao prostor za nesmetano provođenje regeneracije te zadovoljile hidrauličke karakteristike, odnosno:

$$H_{p,um}=2 \cdot h_{m,um} \cdot \quad (24)$$

3.1.1.2. Regeneracija ionske mase

Nakon 16 sati rada, počinje proces istosmjernje regeneracije ionske mase umekšivača u trajanju od 3 h i 6 min. Kao sredstvo za regeneraciju koristi se 10%-tna vodena otopina natrijeva klorida, NaCl. Na raspolaganju je peletirana sol, NaCl, koja se ubacuje direktno u spremnik s vodom. Maksimalna topljivost natrijeva klorida pri normalnim uvjetima u ovom slučaju je 26%. Stoga se 26%-tna vodena otopina natrijeva klorida dozira u statički mješač gdje se miješa s umekšanom vodom iz predviđenog spremnika te se tako dobiva 10%-tna vodena otopina NaCl za regeneraciju. Regeneracijska doza, odnosno potrošak soli za regeneraciju je 200 g/L. Povećanim potroškom soli je osigurana kvalitetna regeneracija jer više soli dolazi u kontakt s ionskom masom, pri čemu natrijevi ioni mijenjaju kalcijeve i magnezijeve ione na masi. Posljedično je veća sigurnost protiv zadržavanja neželjenih iona na ionskoj masi, što se može vidjeti iz sljedećeg dijagrama u logaritamskom mjerilu:



Slika 22. Kvaliteta umekšane vode ovisno o utrošku soli za istosmjernu regeneraciju [1]

Koncentracija ukupno otopljenih tvari (*TDS*) u vodovodnoj vodi je približno 623 mg/L. Ukoliko je doza regeneranta 200 g/L, vidljivo je da se jako mali dio mase neće regenerirati. Koncentracija neželjenih iona u tretiranoj vodi je 1 – 3 ppm CaCO₃.

Masa 100%-tnog natrijevog klorida je:

$$m_{100\%NaCl} = V_m \cdot d_{NaCl} \quad (25)$$

gdje je d_{NaCl} doza regeneranta u g/L.

Odredivši masu potrebne peletirane soli, moguće je jednostavno odrediti masu 26%-tne vodene otopine NaCl za regeneraciju:

$$m_{26\%NaCl} = \frac{m_{100\%NaCl}}{0,26} \quad (26)$$

Tada je volumen 26%-tne otopine natrijevog klorida:

$$V_{26\%NaCl} = \frac{m_{26\%NaCl}}{\rho_{26\%NaCl}} \quad (27)$$

gdje je $\rho_{26\%NaCl}$ gustoća 26%-tne vodene otopine natrijevog klorida te na 14,5 °C iznosi 1,200 kg/L. Volumen spremnika za 26%-tnu vodenu otopinu natrijeva klorida odabran je prema sljedećem izrazu:

$$V_{s,26\%NaCl} = 1,2 \cdot V_{26\%NaCl} \quad (28)$$

Potrebno je odrediti volumen umekšane vode za razrjeđenje 26%-tne vodene otopine na 10%-tnu vodenu otopinu NaCl. Volumen 10%-tne vodene otopine NaCl se određuje preko zakona razrjeđenja:

$$V_{10\%NaCl} = \frac{V_{26\%NaCl} \cdot \rho_{26\%NaCl} \cdot 0,26}{\rho_{10\%NaCl} \cdot 0,1}, \quad (29)$$

gdje je $\rho_{10\%NaCl}$ gustoća 10%-tne vodene otopine natrijeva klorida te na 14,5 °C iznosi 1,073 kg/L.

Potrebni volumen umekšane vode je:

$$V_{um,10\%NaCl} = V_{10\%NaCl} - V_{26\%NaCl} \quad (30)$$

Konačno, određena je pumpa koja mora dopremiti 26%-tnu vodenu otopinu natrijeva klorida do statičkog mješača. Volumni protok koji pumpa mora osigurati određuje se prema:

$$Q_{26\%NaCl} = \frac{V_{26\%NaCl}}{\tau_{10\%NaCl}} \quad (31)$$

gdje je $\tau_{10\%NaCl}$ vrijeme trajanja doziranja 10%-tne vodene otopine natrijeva klorida u ionsku masu, a prema proračunu u računalnom programu Wave iznosi 31,98 min. Tada je volumni protok $Q_{26\%NaCl} = 6,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

Kako je spomenuto u poglavlju 2.3.3.5, potrebno je osigurati protok umekšane vode za rahljenje i ispiranje ionske mase. Prema računalnom programu Wave dobiveni su potrebni volumni protoci za ove procese, a i potrebni volumeni umekšane vode po svakoj regeneraciji. Prema tome, potrebno je osigurati $V_{\text{reg,um}} = 71,04 \text{ m}^3$ umekšane vode. Uvođenjem faktora sigurnosti, potrebni volumen spremnika umekšane vode za rahljenje i ispiranje mase je:

$$V_{\text{S,um}} = 1,2 \cdot V_{\text{reg,um}} \quad (32)$$

Kompletni protokol regeneracije prikazan je u sljedećoj tablici:

Tablica 5. Protokol regeneracije ionske mase umekšivača

| Proces | Protok, m^3/h | Vrijeme, min | Volumen, m^3 | Izvor vode |
|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------------|
| Rahljenje mase | 44,83 | 60 | 44,83 | Umekšana voda |
| Doziranje 10% vodene otopine NaCl | 18,85 | 31,98 | 10,05 | Umekšana voda |
| Sporo ispiranje | 12,42 | 78,05 | 16,16 | Umekšana voda |
| Brzo ispiranje | 60,72 | 15,97 | 16,16 | Recirkulirana voda |

3.1.1.3. Rekapitulacija

Proračunati procesni parametri prilikom umekšavanja:

- Ukupna tvrdoća vode (14) $UT = 7,38 \text{ mval/L}$,
- Kalcijeva tvrdoća (15) $CaT = 5,39 \text{ mval/L}$,
- Magnezijeva tvrdoća (17) $MgT = 1,99 \text{ mval/L}$,
- Ekvivalentna težina kalcija (16) $E_t(\text{Ca}) = 20,04 \text{ mg/mval}$,
- Ekvivalentna težina magnezija (18) $E_t(\text{Mg}) = 12,15 \text{ mg/mval}$,
- Unutarnji promjer posude (19) $d_{\text{u,um}} = 1680 \text{ mm}$,
- Površina presjeka posude (20) $A_{\text{p,um}} = 2,22 \text{ m}^2$,
- Visina ionske mase (21) $h_{\text{m,um}} = 2430 \text{ mm}$,
- Hidrauličko opterećenje (22) $v_{\text{h,um}} = 11 \text{ BV/h}$,
- Linearna brzina (23) $v_{\text{lin,um}} = 27 \text{ m/h}$,
- Visina posude ionskog izmjenjivača (24) $H_{\text{p,um}} = 5000 \text{ mm}$,
- Masa 100%-tnog natrijeva klorida po regeneraciji (25) $m_{100\% \text{NaCl}} = 1080 \text{ kg}$,
- Masa 26%-tne otopine natrijeva klorida po regeneraciji (26) $m_{26\% \text{NaCl}} = 4153,85 \text{ kg}$,

- Volumen 26%-tne otopine natrijeva klorida po regeneraciji (27) $V_{26\%NaCl} = 3461,23 \text{ L}$
- Volumen spremnika 26%-tne otopine natrijeva klorida (28) $V_{s,26\%NaCl} = 4153,48 \text{ L}$,
- Volumen 10%-tne otopine natrijeva klorida po regeneraciji (29) $V_{10\%NaCl} = 10068,5 \text{ L}$,
- Potrebni volumen umekšane vode za razrjeđenje do 10%-tne vodene otopine natrijeva klorida (30) $V_{um,10\%NaCl} = 6607,3 \text{ L}$,
- Volumen spremnika umekšane vode (32) $V_{s,um} = 85\,248 \text{ L}$

Procesni parametri zadovoljavaju uvjete ionske mase Amberlite HPR1100 Na.

Za pohranjivanje 26%-tne vodene otopine natrijeva klorida odabran je horizontalni spremnik proizvođača Karmod od stakloplastike zapremine 25000 L uzevši u obzir da se spremnik puni svakih tjedan dana. Odabrani spremnik za umekšanu vodu je spremnik od stakloplastike zapremine 90000 L proizvođača Karmod.

Kemijski sastav vode nakon umekšavanja prikazan je u sljedećoj tablici:

Tablica 6. Kemijski sastav vode nakon umekšavanja

| Parametar | Mjerna jedinica | Ulazna voda | Umekšana voda | Otpadna voda |
|-------------------------------|-----------------|-------------|---------------|--------------|
| K ⁺ | mg/L | 2,500 | 2,501 | 2 |
| Na ⁺ | mg/L | 16,700 | 186,190 | 3833 |
| Mg ²⁺ | mg/L | 24,200 | 0,036 | 330 |
| Ca ²⁺ | mg/L | 108,000 | 0,162 | 1475 |
| CO ₃ ⁻ | mg/L | 0,608 | 0,579 | 2 |
| HCO ₃ ⁻ | mg/L | 398,950 | 399,140 | 393 |
| CO ₂ | mg/L | 29,098 | 29,086 | 30 |
| NO ₃ ⁻ | mg/L | 21,200 | 21,207 | 21 |
| F ⁻ | mg/L | 0,020 | 0,020 | 0 |
| Cl ⁻ | mg/L | 28,900 | 28,909 | 9228 |
| SO ₄ ²⁻ | mg/L | 21,800 | 21,807 | 22 |
| PO ₄ ³⁻ | mg/L | 0,030 | 0,030 | 0 |
| TDS | mg/L | 663,9 | 701,6 | 15347 |
| El. provodnost | μS/cm | 784 | 769 | 25135 |
| Tvrdoća | mval/L | 7,38 | 0,01 | 100,79 |
| pH | - | 7,31 | 7,33 | 7,03 |

3.1.2. Reverzna osmoza

Postupak pripreme demineralizirane vode u ovom projektu izveden je pomoću reverzne osmoze u dva prolaza s recirkulacijom koncentrata u svakom prolazu. Izvedbom RO sustava u dva prolaza permeat prvog prolaza postaje ulazni protok za drugi prolaz čime se načelno postiže značajnije bolja kvaliteta krajnjeg permeata. Koncentrat se prvenstveno recirkulira kako bi se smanjila količina otpadne vode, a samim time povećao faktor konverzije sustava. Proračunom u računalnom programu Wave dobivena je konfiguracija sustava koja zadovoljava sve procesne parametre. Prvi prolaz sastoji se od četrdeset paralelno povezanih membranskih modula od kojih svaki ima šest serijski povezanih membrana. U drugom prolazu se nalazi trideset međusobno paralelno povezanih membranskih modula od kojih svaki ima šest serijski povezanih membrana. Odabrane membrane, FilmTec Hypershell HSRO-390, su proizvod

američke tvrtke DuPont. To je poliamidna membrana koja, prema preporuci proizvođača, isporučuje izvrsnu kvalitetu vode te može podnijeti visoke temperature u slučaju sanitacije vrućom vodom, točnije 85 °C. Kako bi se osigurao ispravan rad membrana, prije ulaska u RO sustav voda se predobrađuje doziranjem kemikalije za uklanjanje rezidualnog klora i antiskalanta što je detaljnije pojašnjeno u sljedećim poglavljima. U sljedećoj tablici su prikazani osnovni parametri RO sustava, volumni protok ulazne vode Q_u , volumni protok permeata Q_p te faktor konverzije Y :

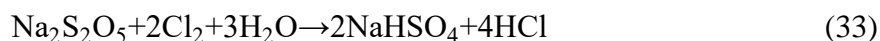
Tablica 7. Pregled osnovnih parametara RO sustava

| Q_u [m ³ /h] | Q_p [m ³ /h] | Y [%] |
|---------------------------|---------------------------|---------|
| 225,2 | 178,8 | 79,4 |

3.1.2.1. Uklanjanje slobodnog rezidualnog klora

Klor (Cl_2) se koristi za tretiranje vodovodne pitke vode zbog sposobnosti brze inaktivacije patogenih mikroorganizama. Obično se koristi u formi natrijevog hipoklorita ili kalcijevog hipoklorita. Nakon dezinfekcije vode, ostaje određena količina slobodnog rezidualnog klora koji može oštetiti membrane u procesu reverzne osmoze. Stoga, ulazna voda mora biti deklorirana kako bi se spriječila oksidacija membrana. Prvi pokazatelji degradacije membrana klorom su gubitak fluksa permeata nakon kojeg dolazi nagli porast fluksa permeata i fluksa otopljene tvari. Degradacija membrana se obično javlja nakon približno 200 do 1000 sati izlaganja 1 mg/L slobodnog rezidualnog klora.

Slobodni rezidualni klor se može reducirati na bezopasne kloride pomoću kemijskih reducirajućih tvari. Najčešće se koristi natrijev metabisulfit, $Na_2S_2O_5$. Iako postoje i druge tvari (npr. sumporov dioksid), one nisu toliko isplative kao natrijev metabisulfit, zbog čega se i koristi u ovom projektu za uklanjanje slobodnog rezidualnog klora. Natrijev metabisulfit sa slobodnim rezidualnim klorom reagira prema sljedećem:



Iz jednadžbe (33) vidi se stehiometrijski odnos natrijeva metabisulfita i slobodnog rezidualnog klora:

$$n(Na_2S_2O_5):n(Cl_2)=1:2 \quad (34)$$

Iz ovog podatka može se odrediti koliko je teoretski potrebna masa natrijeva metabisulfita za uklanjanje slobodnog rezidualnog klora. Molarna masa natrijeva metabisulfita $M(Na_2S_2O_5) = 190,107$ g/mol, a klora $M(Cl_2) = 70,91$ g/mol. Slijedi da je, teoretski, za 1 mg slobodnog

rezidualnog klora potrebno osigurati 1,34 mg natrijeva metabisulfita. Naime, u vodenim otopinama se formira natrijev bisulfit prema sljedećem:



Uz molarnu masu natrijeva bisulfita $M(\text{NaHSO}_3) = 104,061$ g/mol, lako se može odrediti da je teoretski potrebno 1,47 mg natrijeva bisulfita za uklanjanje 1 mg slobodnog rezidualnog klora. U praksi se obično koristi 2-3 mg natrijeva metabisulfita kako bi se uklonio 1 mg slobodnog rezidualnog klora radi osiguranja i dodatne zaštite membrana. Ovaj kemijski spoj u čvrstom stanju ima životni vijek 4 – 6 mjeseci ako se skladišti u hladnim i suhim uvjetima. U reakciji s vodom, formira se natrijev bisulfit koji u kontaktu sa zrakom može oksidirati zbog čega ima ograničen vijek trajanja. Orijentacijske vrijednosti vijeka trajanja vodene otopine natrijeva bisulfita u ovisnosti o masenoj koncentraciji prikazane su u sljedećoj tablici:

Tablica 8. Vijek trajanja vodene otopine natrijeva bisulfita [14]

| Masena koncentracija (%) | Vijek trajanja |
|--------------------------|----------------|
| 10 | 1 tjedan |
| 20 | 1 mjesec |
| 30 | 6 mjeseci |

Iako se uklanjanje klora odvija brzo, preporuča se korištenje statičkih mješača kako bi se osigurala bolja topljivost.

Maksimalna dopuštena koncentracija slobodnog rezidualnog klora u pitkoj vodovodnoj vodi iznosi 0,5 mg/L. S obzirom na to da je projektnim zadatkom određeno da je izvor pitka voda iz sustava javne vodoopskrbe, uzima se da je upravo ta vrijednost mjerodavna za daljnji proračun. Prema tome je određen maseni protok slobodnog rezidualnog klora:

$$q_{m,\text{Cl}_2} = Q_u \cdot c_{\text{Cl}_2,\text{maks}} \quad (36)$$

gdje je Q_u ulazni protok u RO sustav, a $c_{\text{Cl}_2,\text{maks}}$ maksimalna dopuštena koncentracija slobodnog rezidualnog klora. Prema preporuci proizvođača, uzima se da je maseni protok natrijeva bisulfita tri puta veći, odnosno:

$$q_{m,\text{NaHSO}_3} = 3 \cdot q_{m,\text{Cl}_2} \quad (37)$$

Odabrana je 30%-tna otopina natrijeva bisulfita zbog najduljeg vijeka trajanja prema tablici 7. Volumni protok dozirane 30%-tne vodene otopine natrijeva bisulfita određuje se prema sljedećem:

$$Q_{30\%\text{NaHSO}_3} = \frac{q_{m,\text{NaHSO}_3}}{c_{\text{NaHSO}_3}}, \quad (38)$$

gdje je c_{NaHSO_3} koncentracija natrijeva bisulfita te iznosi 300 g/kg, odnosno uz gustoću 30%-tne otopine natrijeva bisulfita od 1,2356 kg/L, 370,68 g/L. Volumen potrebnog spremnika je tada:

$$V_{\text{s,NaHSO}_3} = 1,2 \cdot 480 \cdot Q_{30\%\text{NaHSO}_3} \quad (39)$$

gdje 480 predstavlja broj radnih sati u jednom mjesecu. Predviđeno je da će se spremnik puniti jednom mjesečno. Ulazni protok u RO sustav je poznat te iznosi 225,2 m³/h čime su određeni ostali parametri:

- maseni protok slobodnog rezidualnog klora (36) $q_{\text{m,Cl}_2} = 112,60$ g/h,
- maseni protok natrijeva bisulfita (37) $q_{\text{m,NaHSO}_3} = 337,80$ g/h,
- volumni protok 30%-tne vodene otopine natrijeva bisulfita (38) $Q_{30\%\text{NaHSO}_3} = 0,911$ L/h
- volumen spremnika za doziranje natrijeva bisulfita (39) $V_{\text{s,NaHSO}_3} = 524,9$ L.

Odabran je spremnik za doziranje, Grundfos DTS 1000 L s obzirom na to da kao 30%-tna vodena otopina može stajati 6 mjeseci. Također, potrebno je odabrati dozirnu pumpu koja će dozirati 30%-tnu vodenu otopinu natrijeva bisulfita neposredno prije RO sustava. Uz poznati protok prema izrazu (38) odabire se dozirna pumpa Grundfos DDC 6-10.

3.1.2.2. Doziranje antiskalanta

Antiskalanti su grupa kemikalija koje služe za sprječavanje formiranja kamenca i drugih kristaliziranih mineralnih soli koje se nakupljaju na RO membranama. Ova pojava dovodi do lošije kvalitete permeata, povećane potrošnje vode, smanjenje stupnja konverzije te uvećane potrošnje energije. Uobičajene soli koje uzrokuju štetne naslage na membranama su:

- Kalcijev karbonat, CaCO₃,
- Kalcijev sulfat, CaSO₄,
- Stroncijev sulfat, SrSO₄,
- Barijev sulfat, BaSO₄,
- Kalcijev fosfat, Ca₃(PO₄)₂ i
- Kalcijev fluorid, CaF₂

Iako u RO sustav protječe voda vrlo niske tvrdoće, doziranjem antiskalanta, sustav se maksimalno osigurava protiv stvaranja naslaga mineralnih soli. U računalnom programu Wave potrebna doza antiskalanta se odabire prema vrijednosti Langelierovog indeksa zasićenja, *LSI*. Kada vrijednost tog indeksa padne ispod nule, smatra se da ne postoji opasnost od taloženja

naslaga na membranama. Tablica 9 prikazuje karakteristike vode prema iznosu Langelierovog indeksa zasićenja [1]:

Tablica 9. Vrijednosti indeksa zasićenja prema Langelieru

| <i>LSI</i> | Karakteristika vode |
|------------|--|
| -5 | vrlo agresivna voda vrlo intenzivna korozija |
| -4 | vrlo agresivna voda vrlo intenzivna korozija |
| -3 | agresivna voda intenzivna korozija |
| -2 | agresivna voda intenzivna korozija |
| -1 | umjereno agresivna voda korozija prisutna |
| -0,5 | ravnotežna do slabo agresivna voda korozija moguća |
| 0 | ravnotežna voda korozija se ne očekuje |
| 0,5 | voda slabe sklonosti taloženju korozija se ne očekuje |
| 1 | umjerena sklonost taloženju korozija se ne očekuje |
| 2 | sklonost taloženju korozija se ne očekuje |
| 3 | izražena sklonost taloženju korozija se ne očekuje |
| 4 | vrlo izražena sklonost taloženju korozija se ne očekuje |

Iz tablice se vidi da bi vrijednost *LSI* trebala biti blizu nule kako voda ne bi bila agresivna u smislu mogućnosti pojave korozije, a da pritom ne postoji sklonost taloženju, odnosno stvaranju naslaga na membranama. U sklopu računalnog programa, jedini mogući izbor za antiskalant je

natrijev heksametafosfat, $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$. U pravilu se ovaj antiskalant više ne preporučuje zbog mogućnosti hidrolize u spremniku za doziranje što kasnije može dovesti do smanjenja efikasnosti uklanjanja kamenca. Iz tog razloga je odabran jednakovrijedni antiskalant PermaTreat PC-191T, proizvođača Nalco koji se često koristi u obradi vode, a natrijev heksametafosfat je samo jedan od njegovih konstituenata. To je bistra, žuta otopina, mirisa sličnog amonijaku. Ima gustoću 1,36 kg/L i pH vrijednost koja varira između 9,5 i 11,5. Potrebno je odrediti dnevnu potrošnju antiskalanta. Odabrana doza je 3 mg/L tretirane vode. Maseni protok antiskalanta je:

$$q_{m,an} = Q_u \cdot c_{an} \quad (40)$$

gdje je Q_u ulazni volumni protok vode u RO sustav, a c_{an} koncentracija antiskalanta. Tada je volumni protok antiskalanta jednak:

$$Q_{an} = \frac{q_{m,an}}{\rho_{an}} \quad (41)$$

gdje je ρ_{an} gustoća antiskalanta koja iznosi 1,36 kg/L. S obzirom da postrojenje radi u dvije smjene tj. $\tau = 16$ h, potrebni volumen antiskalanta je:

$$V_{an} = Q_{an} \cdot \tau \quad (42)$$

a potrebna masa:

$$m_{an} = \rho_{an} \cdot V_{an} \quad (43)$$

Dobivene su sljedeće vrijednosti:

- maseni protok antiskalanta (40) $q_{m,an} = 675,6$ g/h,
- volumni protok antiskalanta (41) $Q_{an} = 0,5$ L/h,
- potrebni volumen antiskalanta (42) $V_{an} = 7,95$ L/dan,
- potrebna masa antiskalanta (43) $m_{an} = 10,81$ kg/dan

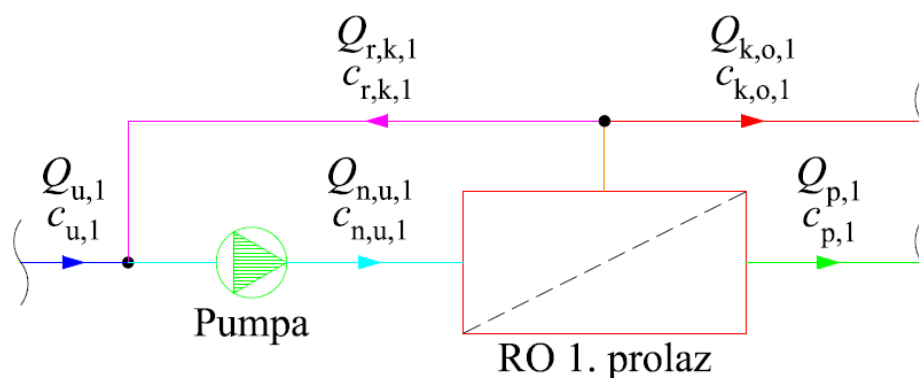
PermaTreat PC-191T je dostupan na tržištu u kanistrima od 25 kg. Prema tome, jedan kanistar antiskalanta koristiti će se za 2 radna dana. Prema preporuci proizvođača, antiskalant može stajati unutar postrojenja maksimalno jednu godinu. S obzirom na to, predviđen je volumena 3500 L proizvođača Holloway America iz kojeg će se direktno automatski dozirati neposredno prije RO sustava. Odabrana dozirna pumpa antiskalanta prema dobivenim parametrima je Grundfos DDC 6-10.

3.1.2.3. Prvi prolaz RO sustava

Prema proračunu u računalnom programu Wave, konfiguracija prvog prolaza RO sustava sastoji se od 40, paralelno spojenih, membranskih modula od kojih svaki ima ugrađenih 6 FilmTec Hypershell HSRO-390 membrana. Procesni parametri prvog prolaza su:

- ulazni protok vode prvog prolaza $Q_{u,1} = 225,2 \text{ m}^3/\text{h}$,
- protok permeata prvog prolaza $Q_{p,1} = 200,7 \text{ m}^3/\text{h}$,
- protok koncentrata prvog prolaza $Q_{k,1} = 245,2 \text{ m}^3/\text{h}$,
- protok koncentrata prvog prolaza koji se odbacuje $Q_{k,o,1} = 24,5 \text{ m}^3/\text{h}$,
- protok recirkuliranog koncentrata prvog prolaza $Q_{r,k,1} = 220,7 \text{ m}^3/\text{h}$,
- neto ulazni protok u prvi prolaz $Q_{n,u,1} = 445,9 \text{ m}^3/\text{h}$,
- faktor konverzije prvog prolaza $Y_1 = 45\%$,
- uprosječni fluks permeata kroz membranu $J_{p,1} = 23,1 \text{ L m}^{-2}\text{h}^{-1}$,
- tlak na ulazu prvog prolaza $p_1 = 11,6 \text{ bar}$.

Na sljedećoj slici nalazi se shematski prikaz prvog prolaza RO sustava:



Slika 23. Shematski prikaz prvog prolaza RO sustava

Kvaliteta vode nakon prvog prolaza RO sustava prikazana je u sljedećoj tablici:

Tablica 10. Kvaliteta vode u prvom prolazu

| Parametar | Mjerna jedinica | Ulazna voda | Ulazna voda + recirkulirani koncentrat | Koncentrat | Permeat |
|-------------------------------|-----------------|-------------|--|------------|---------|
| K ⁺ | mg/L | 2,50 | 12,38 | 22,46 | 0,06 |
| Na ⁺ | mg/L | 186,2 | 919,5 | 1667 | 5,21 |
| Mg ²⁺ | mg/L | 0,04 | 0,18 | 0,33 | 0,00 |
| Ca ²⁺ | mg/L | 0,16 | 0,81 | 1,48 | 0,00 |
| CO ₃ ²⁻ | mg/L | 0,58 | 18,26 | 50,56 | 0,00 |
| HCO ₃ ⁻ | mg/L | 399,1 | 1946 | 3495 | 9,78 |
| NO ₃ ⁻ | mg/L | 21,21 | 96,01 | 172,3 | 2,74 |
| F ⁻ | mg/L | 0,02 | 0,10 | 0,18 | 0,00 |
| Cl ⁻ | mg/L | 28,91 | 143,4 | 260,1 | 0,66 |
| SO ₄ ²⁻ | mg/L | 21,81 | 108,8 | 197,6 | 0,33 |
| PO ₄ ³⁻ | mg/L | 0,03 | 0,15 | 0,27 | 0,00 |
| CO ₂ | mg/L | 29,09 | 28,87 | 39,07 | 31,85 |
| TDS | mg/L | 660,6 | 3245 | 5867 | 18,78 |
| El. provodnost | μS/cm | 769 | 3529 | 6147 | 24 |
| pH | - | 7,3 | 7,9 | 8,0 | 5,8 |

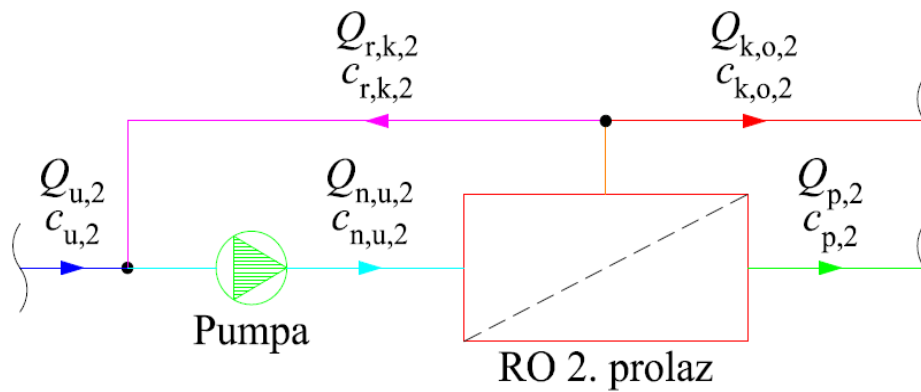
3.1.2.4. Drugi prolaz RO sustava

Permeat prvog prolaza postaje ulazna voda drugog prolaza koja se dodatno pročišćava čime se postiže značajnije bolja kvaliteta. Konfiguracija drugog prolaza RO sustava sastoji se od 30, paralelno spojenih, membranskih modula od kojih svaki ima ugrađenih 6 Filmtec Hypershell HSRO-390 membrana. Procesni parametri drugog prolaza su:

- ulazni protok vode drugog prolaza $Q_{u,2} = 200,7 \text{ m}^3/\text{h}$,
- protok permeata drugog prolaza $Q_{p,2} = 178,8 \text{ m}^3/\text{h}$,
- protok koncentrata drugog prolaza $Q_{k,2} = 218,5 \text{ m}^3/\text{h}$,
- protok koncentrata drugog prolaza koji se odbacuje $Q_{k,o,2} = 21,9 \text{ m}^3/\text{h}$,

- protok recirkuliranog koncentrata drugog prolaza $Q_{r,k,2} = 196,4 \text{ m}^3/\text{h}$,
- neto ulazni protok u drugi prolaz $Q_{n,u,2} = 397,1 \text{ m}^3/\text{h}$,
- faktor konverzije drugog prolaza $Y_2 = 45\%$,
- uprosječni fluks permeata kroz membranu $J_{p,2} = 27,4 \text{ L m}^{-2}\text{h}^{-1}$,
- tlak na ulazu drugog prolaza $p_2 = 10,4 \text{ bar}$.

Na sljedećoj slici nalazi se shematski prikaz drugog prolaza RO sustava:



Slika 24. Shematski prikaz drugog prolaza RO sustava

Kvaliteta vode nakon drugog prolaza RO sustava prikazana je u sljedećoj tablici:

Tablica 11. Kvaliteta vode u drugom prolazu

| Parametar | Mjerna jedinica | Ulazna voda | Ulazna voda + recirkulirani koncentrat | Koncentrat | Permeat |
|-------------------------------|-----------------|-------------|--|------------|---------|
| K ⁺ | mg/L | 0,06 | 0,31 | 0,56 | 0,00 |
| Na ⁺ | mg/L | 5,21 | 25,48 | 46,15 | 0,2 |
| Mg ²⁺ | mg/L | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ca ²⁺ | mg/L | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 |
| CO ₃ ²⁻ | mg/L | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,00 |
| HCO ₃ ⁻ | mg/L | 9,78 | 48,03 | 87,10 | 1,08 |
| NO ₃ ⁻ | mg/L | 2,74 | 12,61 | 22,67 | 0,31 |
| F ⁻ | mg/L | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Cl ⁻ | mg/L | 0,66 | 3,26 | 5,92 | 0,01 |
| SO ₄ ²⁻ | mg/L | 0,33 | 1,64 | 2,97 | 0,00 |
| PO ₄ ³⁻ | mg/L | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| CO ₂ | mg/L | 31,85 | 31,93 | 31,94 | 31,29 |
| TDS | mg/L | 18,78 | 91,35 | 165,4 | 1,62 |
| El. provodnost | μS/cm | 24 | 113 | 202 | 7 |
| pH | - | 5,8 | 6,4 | 6,7 | 4,8 |

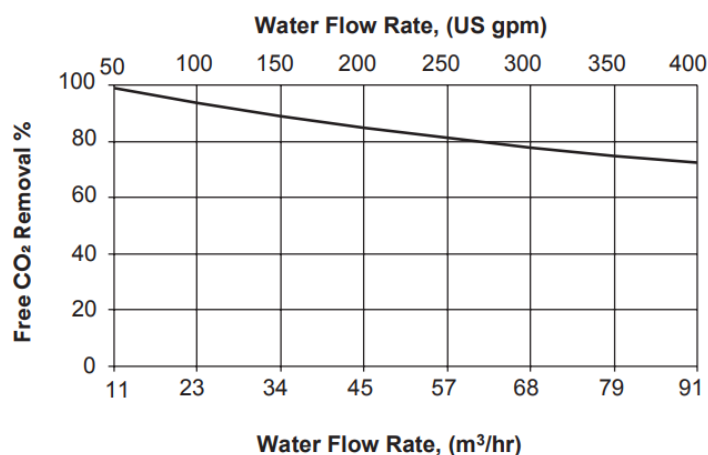
3.1.2.5. Membransko otplinjavanje

U svrhu dodatne pripreme vode za miješani filter, provodi se membransko otplinjavanje CO₂. Nakon dva prolaza u RO sustavu, demineralizirana voda i dalje ima visoku koncentraciju ugljikova dioksida kao što je vidljivo iz tablice 11. Visoke koncentracije ugljikova dioksida mogu uzrokovati lošiji proces ionske izmjene na miješanom filteru zbog zauzimanja većine kapaciteta jako bazne ionske mase. Ovaj postupak je odabran jer ne zahtjeva utrošak kemikalija, a ima mogućnost odvojiti CO₂ iz vode s vrlo visokim postotkom. Odabran je sustav otplinjivača 3M Liqui-Cel EXF-14×28. S obzirom na to da je maksimalni dopušteni volumni protok kroz

jedan modul ovog otplinjivača 91 m³/h, moguće je odrediti broj modula koji je potreban za obradu protoka permeata RO sustava $Q_{p,2} = 178,8$ m³/h prema sljedećoj jednadžbi:

$$N_{o,CO_2} = \frac{Q_{p,2}}{Q_{o,maks}} \quad (44)$$

gdje je $N_{o,CO_2} = 1,96$ broj modula otplinjivača, a $Q_{o,maks}$ maksimalni volumni protok jednog modula. Odabrano je 3 modula kako bi se raspodijelio protok za što bolje uklanjanje CO₂. Tada je maksimalni protok u jednom modulu 59,6 m³/h. Pomoću ovog podatka može se očitati iz dijagrama postotak uklanjanja CO₂. Dijagram prikazuje učinkovitost uklanjanja ugljikova dioksida s obzirom na volumni protok vode.



Slika 25. Dijagram s vrijednostima otplinjavanja CO₂ [15]

3.1.2.6. Spremnik RO permeata

Prema standardu SEMI (*Semiconductor Equipment and Materials International*) potrebno je osigurati retencijsko vrijeme postrojenja u trajanju od 1 sat kako bi se omogućio rad postrojenja dok određena oprema nije u pogonu zbog održavanja, uzimanja uzoraka i sl. te da se u slučaju manjih kvarova omogući rad postrojenja dok se sva oprema ponovno ne pokrene. Iz tog razloga, odabran je spremnik RO permeata zapremine 180 000 L. Ovaj spremnik bit će granični dio između primarne obrade vode i dijela postrojenja u kojem se polira kvaliteta vode. Ultračista voda koja se ne iskoristi, vraća se taj spremnik te ponovno prolazi kroz krug poliranja kvalitete vode i ponovno se uvodi u sustav. Ovime su u svakom trenutku osigurani traženi parametri ultračiste vode, zadani prema normi ASTM D 5127 – 07. Odabran je spremnik proizvođača Hebei Sinta Trading Co. dimenzija (š × d × v): 9 × 5 × 4 m.

3.2. Poliranje kvalitete vode

Demineralizirana voda iz RO sustava još uvijek ne udovoljava standardima ultračiste vode za industriju poluvodiča te se ne može direktno koristiti. Nakon RO sustava, kvaliteta vode se ionskom izmjenom kroz miješani filter polira na tražene vrijednosti. Da bi se osiguralo dodatno uklanjanje ukupnog organskog ugljika i spriječilo nakupljanje organskih tvari na mikroelektroničkoj opremi, ultračista voda prolazi kroz UV reaktor. Budući da postoji određena količina slobodnog CO₂ u vodi koji nastaje UV oksidacijom ukupnog organskog ugljika, ultračista voda prije samog korištenja prolazi kroz dodatni membranski proces otplinjavanja. Voda koja se ne iskoristi u proizvodnji, vraća se u spremnik RO permeata te stalno cirkulira prije same upotrebe.

3.2.1. Miješani filter

Demineralizirana voda u miješane filtre dolazi s volumnim protokom 180 m³/h. Proračunom u računalnom programu dobivena je konfiguracija u kojoj se sustav ionske izmjene s miješanim filtrom sastoji od 4 tlačne posude s ionskom masom. Kroz svaku posudu prolazi 45 m³/h vode. Odabrana je ionska masa Amberlite HPR1200 H u H⁺ formi te Amberlite HPR4200 OH u OH⁻ formi.

3.2.1.1. Volumen i visina ionske mase

Proračun miješanog filtra provodi se prema hidrauličkom opterećenju čiji raspon vrijednosti daje proizvođač ionske mase. Kako su odabrane ionske mase proizvod američke tvrtke DuPont, mjerodavne specifikacije ionskih masa propisane su prema sljedećem [16]:

Tablica 12. Preporučeni radni uvjeti miješanog filtra

| | Poliranje RO permeata i ultračiste vode |
|---------------------------|--|
| Ukupna visina ionske mase | 1000 – 2000 mm |
| Hidrauličko opterećenje | 15 – 40 BV/h |
| Linearna brzina | >24 m/h |

Prema tome, odabrano je hidrauličko opterećenje $S_p = 30 \text{ BV/h}$, odnosno, $30 \frac{\text{m}^3_{\text{vode}}}{\text{m}^3_{\text{mase}} \cdot \text{h}}$.

Volumen ionske mase se može direktno odrediti iz:

$$V_{m,mb} = \frac{Q_{ul,mb}}{S_p} \quad (45)$$

Volumen ionske mase je tada $V_{m,mb} = 1,5 \text{ m}^3$.

Proizvođač također preporučuje raspon odnosa volumena jako kisele mase i jako bazne mase 35:65 – 65:35. Ukupni volumen ionske mase dijeli se na $V_{K2} = 0,525 \text{ m}^3$ jako kisele i $V_{A2} = 0,975 \text{ m}^3$ jako bazne ionske mase. Jako bazna ionska masa će imati veći volumen zbog skoro duplo manjeg korisnog kapaciteta u odnosu na jako kiselu ionsku masu. Pretpostavljeni promjer miješanog filtra je $d_{\text{filtrar}} = 1100 \text{ mm}$. Tada je površina filtra:

$$A_{\text{filtrar}} = \frac{(d_{\text{filtrar}}^2 \cdot \pi)}{4} \quad (46)$$

te iznosi $0,95 \text{ m}^2$. Visina jako kisele ionske mase je:

$$H_{K2} = \frac{V_{K2}}{A_{\text{filtrar}}} \quad (47)$$

a jako bazne ionske mase:

$$H_{A2} = \frac{V_{A2}}{A_{\text{filtrar}}} \quad (48)$$

te iznose $H_{K2} = 0,55 \text{ m}$ i $H_{A2} = 1,03 \text{ m}$. Ukupna visina ionske mase je:

$$H_{m,mb} = H_{K2} + H_{A2} \quad (49)$$

odnosno $H_{m,mb} = 1,58 \text{ m}$. Ova vrijednost zadovoljava postavljene DuPont-ove uvjete navedene u tablici 12. Za visinu tlačne posude obično se uzima dva puta veća vrijednost od visine ionske mase, stoga je visina filtra:

$$H_p = 2 \cdot H_{m,mb} \quad (50)$$

te iznosi $3,16 \text{ m}$. Odabrane dimenzije miješanog filtra su $\phi 1100 \text{ mm} \times 3200 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$. U računalnom programu dobivene su hidrauličke karakteristike u realnim radnim uvjetima:

- Hidrauličko opterećenje $S_p = 34,37 \text{ BV/h}$
- Linearna brzina $v_{\text{lin,mb}} = 48 \text{ m/h}$

što zadovoljava uvjete proizvođača ionske mase.

3.2.1.2. Protokol regeneracije

Nakon 16 h rada započinje regeneracija ionske mase miješanog filtra. Procijenjeno trajanje regeneracije u računalnom programu je 2 h i 51 min. Jako kisela ionska masa se regenerira 5%-tnom vodenom otopinom sulfatne kiseline, H_2SO_4 , a jako bazna ionska masa 4%-tnom vodenom otopinom natrijevog hidroksida, NaOH . U ovom stupnju obrade, ionska masa se mora regenerirati demineraliziranom vodom, odnosno mora se osigurati odgovarajući volumen te

vode iz miješanog filtra kako bi se mogla provesti regeneracija. Slijedi proračun potrebnih volumena kemikalija za regeneraciju.

Masa 100%-tne H_2SO_4 je:

$$m_{100\%\text{H}_2\text{SO}_4} = V_{K2} \cdot d_{\text{H}_2\text{SO}_4} \quad (51)$$

gdje je $d_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ doza regeneranta za jako kiselu ionsku masu te iznosi 128 g/L. S obzirom da je na raspolaganju 98%-tna vodena otopina sulfatne kiseline, njena masa je tada:

$$m_{98\%\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{m_{100\%\text{H}_2\text{SO}_4}}{0,98} \quad (52)$$

Nadalje, volumen potrebne 98%-tne sulfatne kiseline je:

$$V_{98\%\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{m_{98\%\text{H}_2\text{SO}_4}}{\rho_{98\%\text{H}_2\text{SO}_4}} \quad (53)$$

gdje je $\rho_{98\%\text{H}_2\text{SO}_4}$ gustoća 98%-tne vodene otopine H_2SO_4 koja iznosi 1842 kg/m³. Volumen spremnika iz kojeg će se dozirati 98%-tna vodena otopina H_2SO_4 je:

$$V_{s,\text{H}_2\text{SO}_4} = 1,2 \cdot V_{98\%\text{H}_2\text{SO}_4} \quad (54)$$

što iznosi 0,045 m³. Odabran je spremnik za miješanje proizvođača Holloway America volumena 1500 L koji će se puniti svakih mjesec dana.

Potrebno je razrijediti 98%-tnu vodenu otopinu H_2SO_4 na 5%-tnu. Volumen 5%-tne vodene otopine H_2SO_4 prema zakonu razrjeđivanja je:

$$V_{5\%\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{\rho_{98\%\text{H}_2\text{SO}_4} \cdot V_{98\%\text{H}_2\text{SO}_4} \cdot 0,98}{\rho_{5\%\text{H}_2\text{SO}_4} \cdot 0,05} \quad (55)$$

gdje je $\rho_{5\%\text{H}_2\text{SO}_4}$ gustoća 5%-tne vodene otopine H_2SO_4 te iznosi 1033 kg/m³. Konačno, volumen produktne vode potreban za razrjeđenje s 98% na 5% vodene otopine H_2SO_4 je:

$$V_{v,\text{regH}_2\text{SO}_4} = V_{5\%\text{H}_2\text{SO}_4} - V_{98\%\text{H}_2\text{SO}_4} \quad (56)$$

Potrebno je odrediti pumpu koja će dozirati 98%-tnu vodenu otopinu H_2SO_4 . Vrijeme trajanja doziranja 5%-tne otopine je 15 min, a prema jednadžbi (53) volumen 98%-tne otopine je 0,037 m³. Prema tome je odabrana dozirna pumpa Grundfos DDE 60-10.

Masa 100%-tnog NaOH je:

$$m_{100\%\text{NaOH}} = V_{A2} \cdot d_{\text{NaOH}} \quad (57)$$

gdje je d_{NaOH} doza regeneranta za jako baznu ionsku masu te iznosi 100 g/L. Kako je na raspolaganju 30%-tna vodena otopina natrijevog hidroksida, njegova masa je tada:

$$m_{30\%\text{NaOH}} = \frac{m_{100\%\text{NaOH}}}{0,3} \quad (58)$$

Nadalje, volumen potrebne 30%-tne vodene otopine natrijevog hidroksida je:

$$V_{30\%NaOH} = \frac{m_{30\%NaOH}}{\rho_{30\%NaOH}} \quad (59)$$

gdje je $\rho_{30\%NaOH}$ gustoća 30%-tne vodene otopine NaOH koja iznosi 1331 kg/m^3 . Potrebno je razrijediti 30%-tnu vodenu otopinu NaOH na 4%-tnu. Volumen 4%-tne vodene otopine NaOH prema zakonu razrjeđivanja je:

$$V_{4\%NaOH} = \frac{\rho_{30\%NaOH} \cdot V_{30\%NaOH} \cdot 0,3}{\rho_{4\%NaOH} \cdot 0,04} \quad (60)$$

gdje je $\rho_{4\%NaOH}$ gustoća 4%-tne vodene otopine NaOH te iznosi 1045 kg/m^3 . Volumen spremnika iz kojeg će se dozirati 30%-tna vodena otopina NaOH je:

$$V_{s,NaOH} = 1,2 \cdot V_{30\%NaOH} \quad (61)$$

što iznosi $0,29 \text{ m}^3$.

Potrebno je odrediti pumpu koja će dozirati 30%-tnu vodenu otopinu NaOH. Vrijeme trajanja doziranja 30%-tne otopine je $34,63 \text{ min}$, a prema jednadžbi (59) volumen 30%-tne otopine je $0,24 \text{ m}^3$. Prema tome je odabrana dozirna pumpa Grundfos DME 375 10AR.

Konačno, volumen produktne vode potreban za razrjeđenje s 30% na 4% vodene otopine NaOH je:

$$V_{v,regNaOH} = V_{4\%NaOH} - V_{30\%NaOH} \quad (62)$$

Kompletni protokol regeneracije prikazan je u sljedećoj tablici:

Tablica 13. Protokol regeneracije ionske mase miješanog filtra

| Proces | Protok, m^3/h | Vrijeme, min | Volumen, m^3 | Izvor vode |
|---|----------------------------------|-----------------|--------------------------|---------------------------------|
| Protokol 1 | | | | |
| Rahljenje mase | 7,03 | 30 | 3,52 | Produktna voda miješanog filtra |
| Taloženje | | 10 | | |
| Doziranje 5% vodene otopine H_2SO_4 | 4,82 | 15 | 1,21 | Produktna voda miješanog filtra |
| Sporo ispiranje | 4,73 | 67,55 | 5,32 | Produktna voda miješanog filtra |
| Ispust | | 15 | | |

| | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-------|---------------------------------|
| Dodavanje zraka | 77,92 | 15 | 19,48 | Zrak |
| Taloženje | | 10 | | |
| Spora ispuna | 3,05 | 9,07 | 0,46 | Demineralizirana voda iz RO |
| Brza ispuna | 44,63 | 0,78 | 0,58 | Demineralizirana voda iz RO |
| Brzo ispiranje | 44,63 | 8,73 | 6,49 | Recirkulirana voda |
| Protokol 2 | | | | |
| Rahljenje mase | 7,03 | 30 | 3,52 | Produktna voda miješanog filtra |
| Taloženje | | 10 | | |
| Doziranje 4% vodene otopine NaOH | 3,37 | 34,63 | 1,95 | Produktna voda miješanog filtra |
| Sporo ispiranje | 3,05 | 47,92 | 2,44 | Produktna voda miješanog filtra |
| Ispust | | 15 | | |
| Dodavanje zraka | 77,92 | 15 | 19,48 | Zrak |
| Taloženje | | 10 | | |
| Spora ispuna | 3,05 | 9,07 | 0,46 | Demineralizirana voda iz RO |
| Brza ispuna | 44,63 | 0,78 | 0,58 | Demineralizirana voda iz RO |
| Brzo ispiranje | 44,63 | 8,73 | 6,49 | Recirkulirana voda |

3.2.1.3. Rekapitulacija

Proračunati procesni parametri ionske izmjene u miješanom filtru su:

- volumen ionske mase (45) $V_{m,mb} = 1,5 \text{ m}^3$,
- površina miješanog filtra (46) $A_{\text{filtrar}} = 0,95 \text{ m}^2$,
- visina jako kisele ionske mase (47) $H_{K2} = 0,55 \text{ m}$,
- visina jako bazne ionske mase (48) $H_{A2} = 1,03 \text{ m}$,
- masa 100%-tne H_2SO_4 (51) $m_{100\%\text{H}_2\text{SO}_4} = 67,2 \text{ kg}$,
- masa 98%-tne vodene otopine H_2SO_4 (52) $m_{98\%\text{H}_2\text{SO}_4} = 68,57 \text{ kg}$,
- volumen 98%-tne H_2SO_4 (53) $V_{98\%\text{H}_2\text{SO}_4} = 0,037 \text{ m}^3$,
- volumen 5%-tne H_2SO_4 (55) $V_{5\%\text{H}_2\text{SO}_4} = 1,3 \text{ m}^3$,
- volumen produktne vode za razrjeđenje H_2SO_4 (56) $V_{v,\text{regH}_2\text{SO}_4} = 1,26 \text{ m}^3$,
- masa 100%-tnog NaOH (57) $m_{100\%\text{NaOH}} = 97,5 \text{ kg}$,
- masa 30%-tne vodene otopine NaOH (58) $m_{30\%\text{NaOH}} = 325 \text{ kg}$,
- volumen 30%-tnog NaOH (59) $V_{30\%\text{NaOH}} = 0,24 \text{ m}^3$,
- volumen 4%-tnog NaOH (60) $V_{4\%\text{NaOH}} = 2,33 \text{ m}^3$,
- volumen produktne vode za razrjeđenje NaOH (61) $V_{v,\text{regNaOH}} = 2,09 \text{ m}^3$

Prema izrazima (54) i (61) određeni su potrebni volumeni spremnika za jedan ciklus regeneracije. Spremnici za regenerante će se puniti svakih mjesec dana. Prema tome, za vodenu otopinu sulfatne kiseline odabran je spremnik za miješanje proizvođača Holloway America zapremine 1500 L. Isto tako, za vodenu otopinu natrijeva hidroksida odabran je spremnik istog proizvođača zapremine 10 000 L.

Iz tablice 13 vidljivo je da je ukupni potrebni volumen produktne vode miješanog filtra za regeneraciju:

$$V_{v,\text{reg,uk}} = V_{K2,\text{uk}} + V_{A2,\text{uk}} \quad (63)$$

gdje je $V_{K2,\text{uk}}$ ukupni volumen produktne vode za regeneraciju jako kiselog dijela ionske mase, a $V_{A2,\text{uk}}$ ukupni volumen produktne vode za regeneraciju jako baznog dijela ionske mase. Na kraju se dobiva potrebni volumen spremnika za produktnu vodu za regeneraciju:

$$V_{s,\text{mb,reg}} = 1,2 \cdot V_{v,\text{reg,uk}} \quad (64)$$

koji iznosi 24,024 m³ za regeneraciju jedne tlačne posude. Odabrani spremnik mora biti od visokokvalitetnog materijala, kako se ionska masa ne bi regenerirala onečišćenom vodom. Odabran je spremnik volumena 25 000 L proizvođača Karmod od nehrđajućeg čelika 1.4404 / AISI 316L.

Tablica 14. Kvaliteta vode nakon miješanog filtra

| Parametar | Mjerna jedinica | Ulazna voda | Produktna voda | Otpadna voda |
|-------------------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|
| K ⁺ | mg/L | 0,001 | 0,000 | 0 |
| Na ⁺ | mg/L | 0,206 | 0,000 | 0 |
| Mg ²⁺ | mg/L | 0,000 | 0,000 | 3029 |
| Ca ²⁺ | mg/L | 0,000 | 0,000 | 0 |
| CO ₃ ²⁻ | mg/L | 0,000 | 0,000 | 20 |
| HCO ₃ ⁻ | mg/L | 0,227 | 0,000 | 0 |
| CO ₂ | mg/L | 0,157 | 0,000 | 0 |
| NO ₃ ⁻ | mg/L | 0,319 | 0,000 | 15 |
| F ⁻ | mg/L | 0,000 | 0,000 | 0 |
| Cl ⁻ | mg/L | 0,013 | 0,000 | 1 |
| SO ₄ ²⁻ | mg/L | 0,004 | 0,000 | 3941 |
| PO ₄ ³⁻ | mg/L | 0,000 | 0,000 | 0 |
| SiO ₂ | mg/L | 0,000 | 0,000 | 0 |
| TDS | mg/L | 0,992 | 0,001 | 7835 |
| El. provodnost | μS/cm | 1,14 | 0,055 | 18194 |
| Tvrdoća | mval/L | 0,00 | 0,00 | 0 |
| pH | - | 6,46 | 7,18 | 12,82 |

3.2.2. UV reaktor

Nakon miješanog filtra, ultračista voda se dodatno obrađuje u UV reaktoru u svrhu uklanjanja ukupnog organskog ugljika. Ovaj postupak se provodi da bi se spriječio nastanak bioobraštaja na instalacijama prije same upotrebe. Bitno je napomenuti da se radi o UV svjetiljkama koje emitiraju fotone na valnoj duljini 185 nm što se i u industriji koristi za destrukciju ukupnog

organskog ugljika. Prema tome, odabran je UV sustav Aquafine Avant proizvođača Trojan Technologies. Modul ovog sustava se sastoji od 44 UV svjetiljke snage 155 W jednoliko raspoređene po promjeru kućišta. Maksimalni protok vode koji se može obraditi u ovom sustavu je 196,9 m³/h, čime su zadovoljeni parametri u projektiranom postrojenju.

Uklanjanjem ukupnog organskog ugljika UV oksidacijom, kako je pojašnjeno u poglavlju 2.6, nastaje ugljikov dioksid i voda. Radi osiguranja, nakon UV reaktora postavljen je još jedan sustav membranskih otplinjivača 3M Liqui-Cel EXF-14×28.

3.2.3. Ultrafiltracija

Unutar svakog postrojenja za proizvodnju ultračiste vode u industriji poluvodiča, neposredno prije korištenja preporučuje se upotreba membranske filtracije (*Point-of-use filters*). Naime, postoji mogućnost, iako mala, za nakupljanje mikročestica unutar cjevovoda koje se obično uklanjaju takvim tehnologijama. S obzirom na to da je ovo postrojenje koje zahtjeva vodu najviše kvalitete u industriji, u ovom projektu je predviđen sustav modula membrana za ultrafiltraciju. Proračun je izveden uz pomoć računalnog programa Wave gdje je odabrana odgovarajuća konfiguracija membranskih modula. Odabrane su membrane Integraflux SFP-2880XP američke tvrtke DuPont. To su membrane od PVDF vlakana s velikom čvrstoćom i visokom otpornošću na kemikalije, namijenjene za postrojenja s protocima većim od 50 m³/h. U sljedećoj tablici prikazani su osnovni podaci ovih membrana:

Tablica 15. Specifikacije membrane InegraFlux SFP - 2880XP

| IntegraFlux SFP - 2880XP | |
|---------------------------------|-------------------|
| Efektivna površina membrane | 77 m ² |
| Duljina | 2,360 m |
| Masa (prazni modul) | 61 kg |
| Masa (napunjeno vodom) | 100 kg |
| Volumen vode | 39 L |

Prema proizvođaču, maksimalni mogući protok kroz jedan modul je $Q_{UF,maxs} = 8,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Uz poznati volumni protok ultračiste vode prije samog korištenja, moguće je odrediti teorijski potrebni broj membrana:

$$N_{UF} = \frac{Q_{mb}}{Q_{UF,maxs}} \quad (65)$$

gdje je $Q_{mb} = 175 \text{ m}^3/\text{h}$ ulazni protok u sustav. Teorijski broj membrana je tada $N_{UF} = 20,59$. U računalnom programu je uzet u obzir fluks permeata kroz membranu koji mora biti unutar područja $40 - 110 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ h})$, stoga je odabrano 36 membranskih modula uz koje je prosječni fluks permeata kroz membranu $66 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ h})$ te su zadovoljene sve hidrauličke karakteristike.

3.3. Cjevovodi

Nakon provedenog proračuna svih procesa u postrojenju, potrebno je dimenzionirati cjevovode koji kroz koje voda dolazi u odgovarajući stupanj obrade. Svi cjevovodi izradit će se od nehrđajućeg čelika AISI 316L zbog zahtjeva za visokom pročišćenošću vode. Pretpostavlja se da je brzina strujanja vode u cijevima $v_c = 1 \text{ m/s}$. Zatim se preko poznatih volumnih protoka određuje promjer cjevovoda te uzima prva veća standardna dimenzija cjevovoda. Konačno, računa se nova, stvarna brzina strujanja.

Prema tome, unutarnji promjer cjevovoda od priključka na javnu vodoopskrbu do ionskih umekšivača je:

$$d_{a1} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{ul}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (66)$$

što iznosi $0,293 \text{ m}$. Odabrana je cijev DN 300 ($d_v = 323,9 \text{ mm}$, $s = 3,96 \text{ mm}$).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{a,stv} = \frac{4 \cdot Q_{ul}}{d_{a2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (67)$$

što iznosi $0,86 \text{ m/s}$.

Unutarnji promjer cjevovoda prema ionskim umekšivačima nakon račvanja je:

$$d_{b1} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{ul,1}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (68)$$

što iznosi $0,15 \text{ m}$. Odabrana je cijev DN 150 ($d_v = 168,3 \text{ mm}$, $s = 2,77 \text{ mm}$).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{b,stv} = \frac{4 \cdot Q_{ul,1}}{d_{b2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (69)$$

što iznosi $0,81 \text{ m/s}$.

Unutarnji promjer cjevovoda od spremnika umekšane vode određuje se prema najvećem potrebnom protoku tijekom regeneracije ionskih izmjenjivača. U ovom slučaju se radi o brzom ispiranju te protoku od $60,72 \text{ m}^3/\text{h}$. Tada je:

$$d_{c1} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{bi}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (70)$$

što iznosi 0,15 m. Odabrana je cijev DN 150 ($d_v = 168,3$ mm, $s = 2,77$ mm).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{c,stv} = \frac{4 \cdot Q_{bi}}{d_{c2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (71)$$

što iznosi 0,81 m/s.

Unutarnji promjer cjevovoda od spremnika 10%-tne vodene otopine NaCl prema umekšivačima je:

$$d_{d1} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{10\%NaCl}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (72)$$

što iznosi 0,082 m. Odabrana je cijev DN 80 ($d_v = 88,9$ mm, $s = 2,11$ mm).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{d,stv} = \frac{4 \cdot Q_{10\%NaCl}}{d_{d2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (73)$$

što iznosi 0,93 m/s.

Slijedi proračun dimenzija cijevi RO sustava.

Unutarnji promjer cjevovoda od umekšivača prema RO sustavu je:

$$d_{e1} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{u,1}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (74)$$

što iznosi 0,28 m. Odabrana je cijev DN 300 ($d_v = 323,9$ mm, $s = 3,96$ mm).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{e,stv} = \frac{4 \cdot Q_{u,1}}{d_{e2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (75)$$

što iznosi 0,80 m/s.

Unutarnji promjer cjevovoda nakon miješanja ulaznog protoka u RO sustav s recirkuliranim protokom:

$$d_{f1} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{n,u,1}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (76)$$

što iznosi 0,40 m. Odabrana je cijev DN 400 ($d_v = 406,4$ mm, $s = 4,19$ mm).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{f,stv} = \frac{4 \cdot Q_{n,u,1}}{d_{f2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (77)$$

što iznosi 1 m/s.

Unutarnji promjer cjevovoda ukupnog koncentrata je:

$$d_{g1} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{k,1}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (78)$$

što iznosi 0,29 m. Odabrana je cijev DN 300 ($d_v = 323,9$ mm, $s = 3,96$ mm).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{g,stv} = \frac{4 \cdot Q_{k,1}}{d_{g2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (79)$$

što iznosi 0,87 m/s.

Unutarnji promjer cjevovoda za koncentrat koji se recirkulira je:

$$d_{h1} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{r,k,1}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (80)$$

što iznosi 0,28 m. Odabrana je cijev DN 300 ($d_v = 323,9$ mm, $s = 3,96$ mm).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{h,stv} = \frac{4 \cdot Q_{r,k,1}}{d_{h2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (81)$$

što iznosi 0,78 m/s.

Unutarnji promjer cjevovoda za koncentrat koji se odbacuje je:

$$d_{i1} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{k,o,1}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (82)$$

što iznosi 0,093 m. Odabrana je cijev DN 100 ($d_v = 114,3$ mm, $s = 2,11$ mm).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{i,stv} = \frac{4 \cdot Q_{k,o,1}}{d_{i2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (83)$$

što iznosi 0,72 m/s.

Unutarnji promjer cjevovoda za permeat prvog prolaza je:

$$d_{j1} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{p,1}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (84)$$

što iznosi 0,27 m. Odabrana je cijev DN 300 ($d_v = 323,9$ mm, $s = 3,96$ mm).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{j,stv} = \frac{4 \cdot Q_{p,1}}{d_{j2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (85)$$

što iznosi 0,71 m/s.

Slijedi proračun dimenzija cjevovoda drugog prolaza RO sustava.

Unutarnji promjer cjevovoda nakon miješanja ulaznog protoka u drugi prolaz RO sustav s recirkuliranim protokom:

$$d_{k1} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{n,u,2}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (86)$$

što iznosi 0,37 m. Odabrana je cijev DN 400 ($d_v = 406,4$ mm, $s = 4,19$ mm).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{k,stv} = \frac{4 \cdot Q_{n,u,2}}{d_{k2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (87)$$

što iznosi 0,89 m/s.

Unutarnji promjer cjevovoda ukupnog koncentrata drugog prolaza je:

$$d_{11} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{k,2}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (88)$$

što iznosi 0,28 m. Odabrana je cijev DN 300 ($d_v = 323,9$ mm, $s = 3,96$ mm).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{1,stv} = \frac{4 \cdot Q_{k,2}}{d_{12}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (89)$$

što iznosi 0,77 m/s.

Unutarnji promjer cjevovoda za koncentrat koji se recirkulira je:

$$d_{m1} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{r,k,2}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (90)$$

što iznosi 0,26 m. Odabrana je cijev DN 250 ($d_v = 273,1$ mm, $s = 3,4$ mm).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{m,stv} = \frac{4 \cdot Q_{r,k,2}}{d_{m2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (91)$$

što iznosi 0,98 m/s.

Unutarnji promjer cjevovoda za koncentrat koji se odbacuje je:

$$d_{n1} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{k,o,2}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (92)$$

što iznosi 0,088 m. Odabrana je cijev DN 90 ($d_v = 101,6$ mm, $s = 2,11$ mm).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{n,stv} = \frac{4 \cdot Q_{k,o,2}}{d_{n2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (93)$$

što iznosi 0,82 m/s.

Unutarnji promjer cjevovoda za permeat drugog prolaza je:

$$d_{o1} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{p,2}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (94)$$

što iznosi 0,25 m. Odabrana je cijev DN 250 ($d_v = 273,1$ mm, $s = 3,4$ mm).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{o,stv} = \frac{4 \cdot Q_{p,2}}{d_{o2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (95)$$

što iznosi 0,99 m/s.

Unutarnji promjer cjevovoda za pojedini miješani filter je:

$$d_{p1} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{ul,mb}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (96)$$

što iznosi 0,13 m. Odabrana je cijev DN 125 ($d_v = 141,3$ mm, $s = 2,77$ mm).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{p,stv} = \frac{4 \cdot Q_{ul,mb}}{d_{p2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (97)$$

što iznosi 0,86 m/s.

Za proračun dimenzije cjevovoda od spremnika ultračiste vode za regeneraciju miješanog filtra se uzima volumni protok potreban za rahljenje ionske mase $Q_{rah,mb} = 7,03$ m³/h (jednak je za

regeneraciju jako kiselog i jako baznog dijela ionske mase). Unutarnji promjer cjevovoda je tada:

$$d_{r1} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{rah,mb}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (98)$$

što iznosi 0,05 m. Odabrana je cijev DN 50 ($d_v = 60,3$ mm, $s = 1,65$ mm).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{r,stv} = \frac{4 \cdot Q_{ul,mb}}{d_{r2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (99)$$

što iznosi 0,77 m/s.

Unutarnji promjer cjevovoda od spremnika H_2SO_4 do miješanog filtra je:

$$d_{s1} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{98\%H_2SO_4}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (100)$$

što iznosi 0,041 m. Odabrana je cijev DN 40 ($d_v = 48,3$ mm, $s = 1,65$ mm).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{s,stv} = \frac{4 \cdot Q_{98\%H_2SO_4}}{d_{s2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (101)$$

što iznosi 0,84 m/s.

Unutarnji promjer cjevovoda od spremnika NaOH do miješanog filtra je:

$$d_{t1} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{30\%NaOH}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (102)$$

što iznosi 0,035 m. Odabrana je cijev DN 32 ($d_v = 42,2$ mm, $s = 1,65$ mm).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{t,stv} = \frac{4 \cdot Q_{98\%H_2SO_4}}{d_{t2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (103)$$

što iznosi 0,79 m/s.

Konačno, unutarnji promjer cjevovoda od miješanog filtra do mjesta korištenja je:

$$d_{ul} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{izl,mb}}{v_c \cdot \pi \cdot 3600}}, \quad (104)$$

što iznosi 0,25 m. Odabrana je cijev DN 250 ($d_v = 42,2$ mm, $s = 1,65$ mm).

Tada je nova brzina strujanja:

$$v_{u,stv} = \frac{4 \cdot Q_{izl,mb}}{d_{u2}^2 \cdot \pi \cdot 3600}, \quad (105)$$

što iznosi 0,87 m/s.

3.4. Utrošak kemikalija

Kemikalije koje se koriste u projektiranom postrojenju su:

- natrijev klorid, NaCl za regeneraciju ionske mase umekšivača,
- antiskalant PermaTreat PC-191T,
- natrijev metabisulfit, Na₂S₂O₅ za uklanjanje slobodnog rezidualnog klora,
- sulfatna kiselina, H₂SO₄ za regeneraciju jako kiselog kationskog dijela ionske mase miješanog filtra i
- natrijev hidroksid, NaOH za regeneraciju jako baznog dijela ionske mase miješanog filtra.

Potrebno je prikazati njihov utrošak na dnevnoj, mjesečnoj i godišnjoj bazi. Prema jednadžbi (25) masa 100%-tnog natrijevog klorida za jednu regeneraciju je 1080 kg. Utrošak na mjesečnoj bazi je:

$$m_{100\%NaCl,mj} = 30 \cdot m_{100\%NaCl}, \quad (106)$$

a na godišnjoj bazi:

$$m_{100\%NaCl,god} = 12 \cdot m_{100\%NaCl,mj}. \quad (107)$$

Utrošak antiskalanta PermaTreat PC-191T je prema jednadžbi (43) na dnevnoj bazi je 10,81 kg/dan. Prema tome, utrošak na mjesečnoj bazi je:

$$m_{an,mj} = 30 \cdot m_{an}, \quad (108)$$

a na godišnjoj bazi:

$$m_{an,god} = 12 \cdot m_{an}. \quad (109)$$

Utrošak natrijevog metabisulfita na mjesečnoj bazi je:

$$m_{Na_2S_2O_5,mj} = 480 \cdot q_{m,Na_2S_2O_5}, \quad (110)$$

a na godišnjoj bazi:

$$m_{Na_2S_2O_5,god} = 5760 \cdot q_{m,Na_2S_2O_5}. \quad (111)$$

Utrošak 98%-tne vodene otopine sulfatne kiseline na mjesečnoj bazi je:

$$V_{98\%H_2SO_4,mj} = 30 \cdot V_{98\%H_2SO_4}, \quad (112)$$

a na godišnjoj bazi:

$$V_{98\%H_2SO_4, \text{god}} = 12 \cdot V_{98\%H_2SO_4} \quad (113)$$

Utrošak 30%-tne vodene otopine natrijevog hidroksida na mjesečnoj bazi je:

$$V_{30\%NaOH, \text{mj}} = 30 \cdot V_{30\%NaOH}, \quad (114)$$

a na godišnjoj bazi:

$$V_{30\%NaOH, \text{god}} = 12 \cdot V_{30\%NaOH}. \quad (115)$$

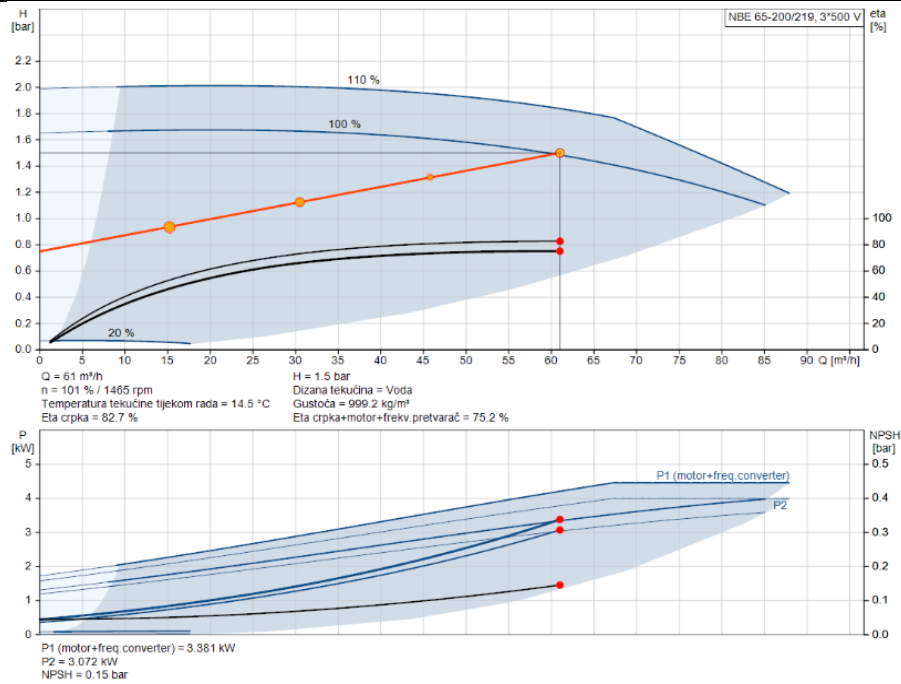
Utrošak svih kemikalija zbirno je prikazan u sljedećoj tablici:

Tablica 16. Utrošak kemikalija

| Kemikalija | Dnevni utrošak | Mjesečni utrošak | Godišnji utrošak |
|--|----------------|------------------|------------------|
| 100%-tni NaCl | 1080 kg | 32400 kg | 388800 kg |
| PermaTreat PC-191T | 10,81 kg | 324,29 kg | 3891,46 kg |
| 100%-tni Na ₂ S ₂ O ₅ | 5,40 kg | 162,14 kg | 1945,73 kg |
| 98%-tna H ₂ SO ₄ | 37,23 L | 1116,80 L | 13401,58 L |
| 30%-tna NaOH | 244,18 L | 7325,32 L | 87903,83 L |

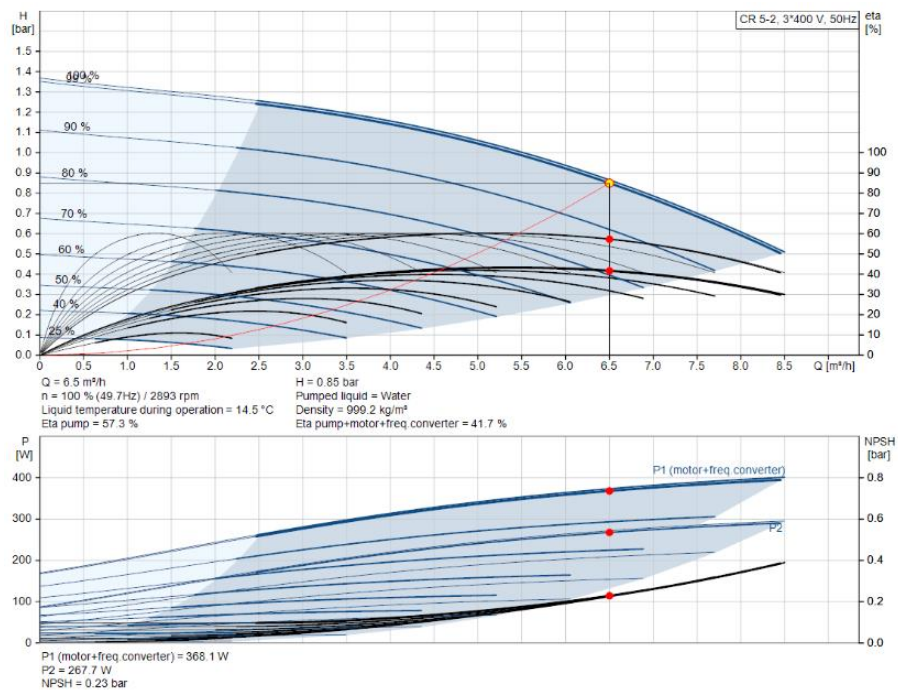
3.5. Odabir pumpi

Osim odabranih dozirnih pumpi, potrebno je i odabrati pumpe za vodu u cijelom procesu. Na početku je odabrana pumpa koja će dopremiti umekšanu vodu iz spremnika umekšane vode do ionskog izmjenjivača. Odabir pumpe je izveden prema dobivenim parametrima u računalnom programu. S obzirom na to da je najveći protok potrebno zadovoljiti prilikom brzog ispiranja (61 m³/h) uz poznatu temperaturu vode (14,5 °C) i pad tlaka (1,5 bar) u kojem su uračunati linijski i lokalni gubitci. Odabrana je pumpa s frekventnom regulacijom Grundfos NBE 65-200/219.



Slika 26. Karakteristike pumpe P1

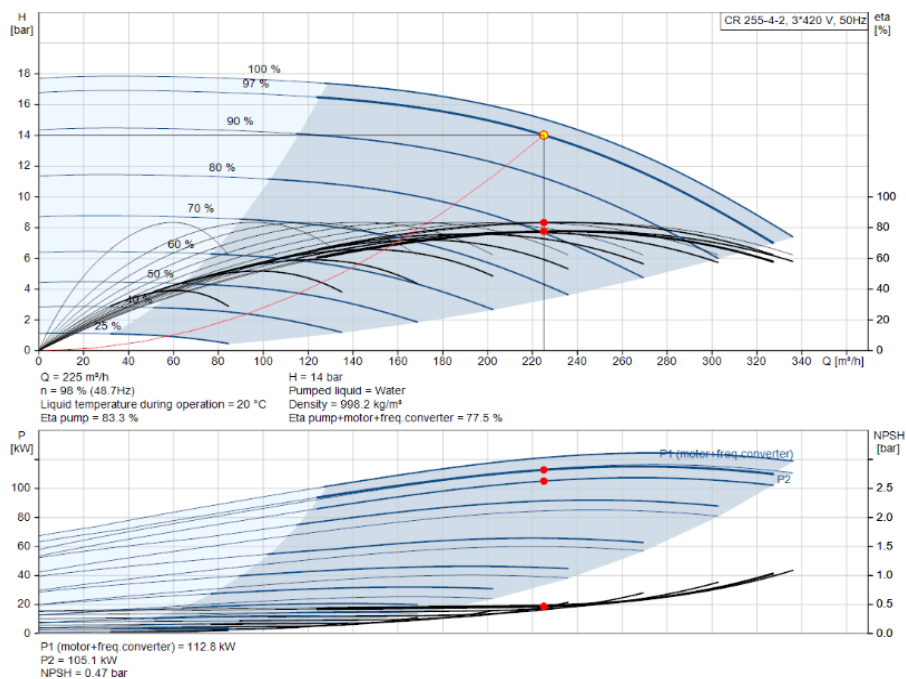
Prema proračunu u poglavlju 3.1.1.2 određen je volumni protok koji je potrebno osigurati za rahljenje mase ionskog izmjenjivača. Uz poznate parametre, odabrana je visokofrekventna centrifugalna pumpa Grundfos CR 5-2.



Slika 27. Karakteristika pumpe P2

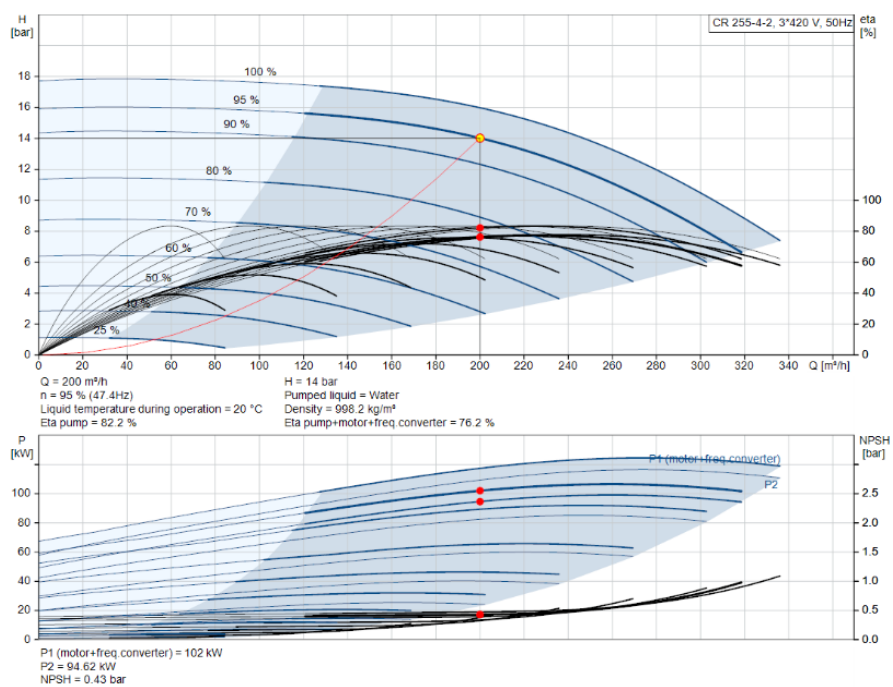
Nadalje, odabrana je pumpa za savladavanje tlaka na prvom prolazu u sustavu RO membrana. Mjerodavan volumni protok u ovom slučaju je neto ulazni protok u prvi prolaz RO sustava (445

m^3/h) uz pad tlaka koji uključuje sve linijske i lokalne gubitke (14 bar). Odabrane su dvije visokofrekventne centrifugalne pumpe Grundfos CR 255-4-2 od u paralelnom spoju.



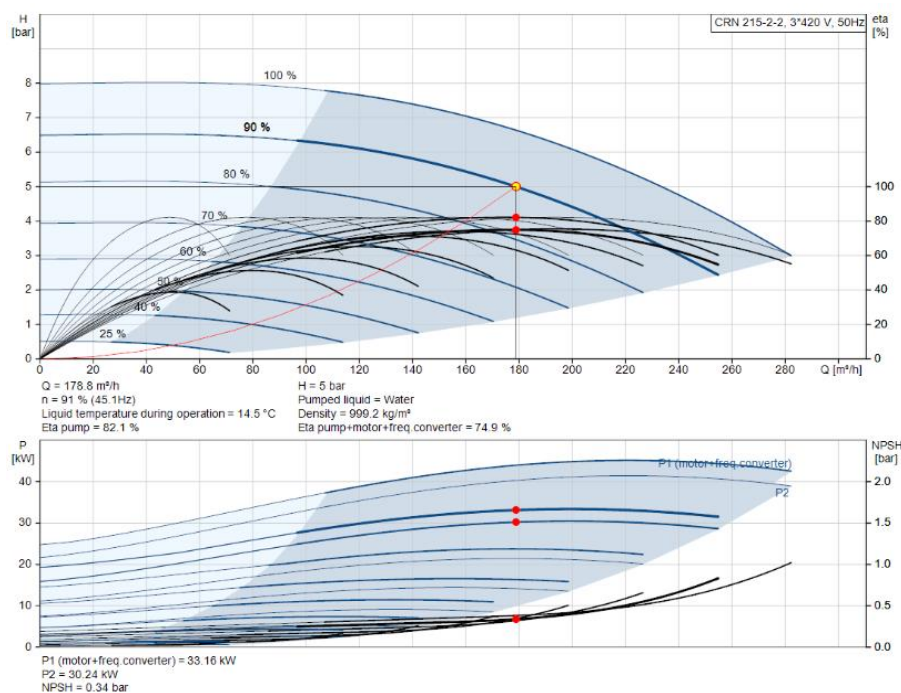
Slika 28. Karakteristika pumpe P5

Isto tako, potrebno je odabrati pumpu koja će savladati tlak na drugom prolazu u sustavu RO membrana (14 bar) uz neto ulazni protok ($397 \text{ m}^3/\text{h}$). Odabrane su dvije visokofrekventne centrifugalne pumpe Grundfos CR 255-4-2 u paralelnom spoju.



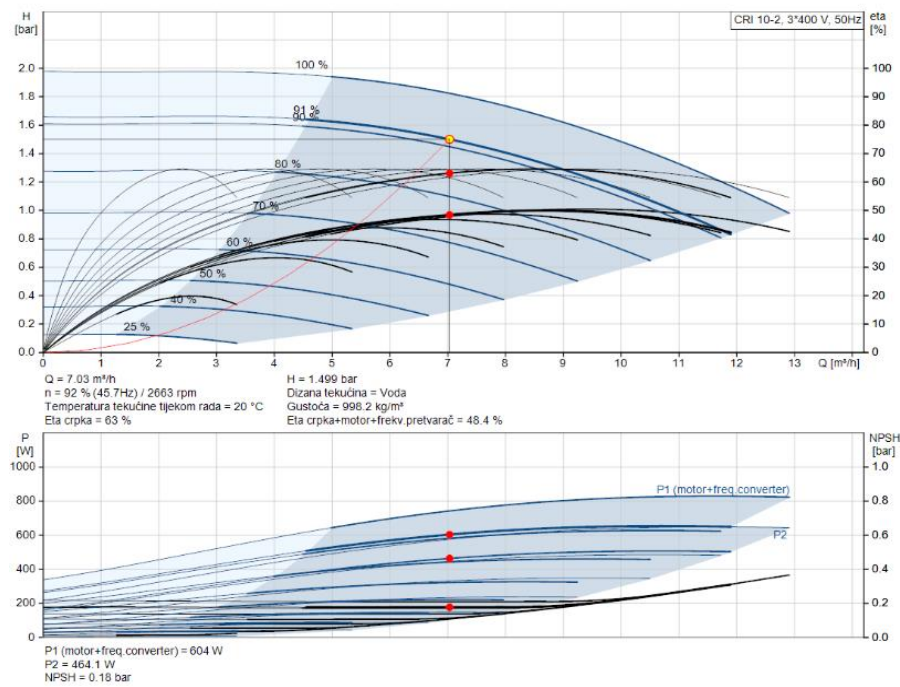
Slika 29. Karakteristika pumpe P6

Demineralizirana voda nakon prolaza kroz RO sustav se vodi u sustav membranskih otplinjivača te prema spremniku RO permeata. S obzirom na proces reverzne osmoze, nije osiguran dovoljan tlak da voda od izlata drugog prolaza RO sustava dospije do spremnika RO permeata. Uz poznati podatak da je maksimalni dopušteni tlak na ulazu u sustav membranskih otplinjivača 7,2 bar, odabire se pumpa vertikalna visokofrekventna centrifugalna pumpa Grundfos CRN 215-2-2.



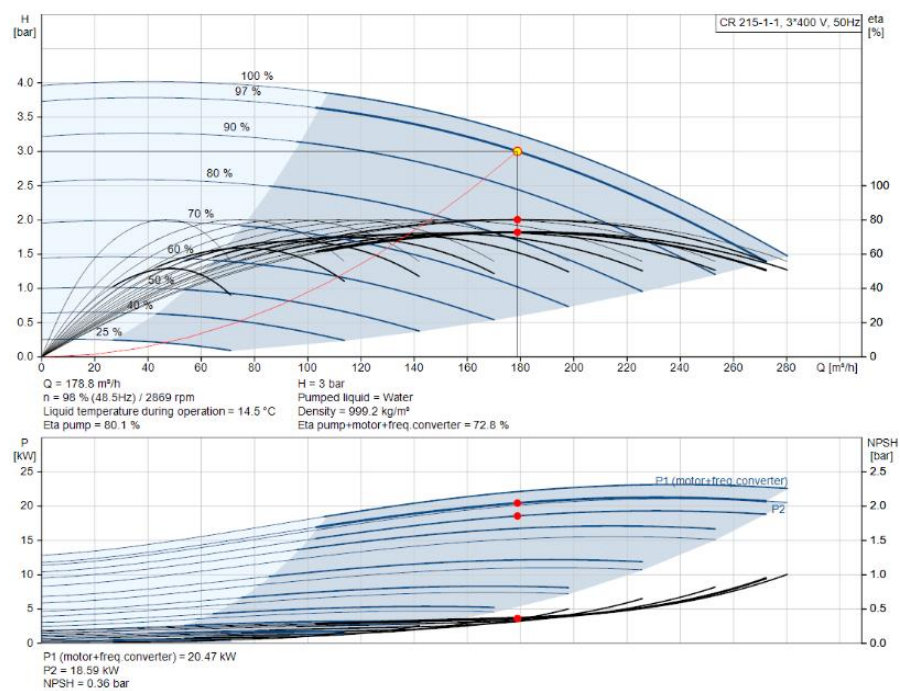
Slika 30. Karakteristika pumpe P13

U sustavu s miješanim filtrom ultračista voda se koristi za regeneraciju ionske mase uz miješanje s regenerantima, stoga je potrebno odrediti pumpu koja će je dovesti od spremnika do ionskog izmjenjivača. Kao mjerodavni protok uzima se 7,03 m³/h (rahljenje mase) uz odgovarajući pad tlaka (1,5 bar). Odabrana je vertikalna višestupanjska centrifugalna pumpa Grundfos CRI 10-2 od nehrđajućeg čelika (EN 1.4401).



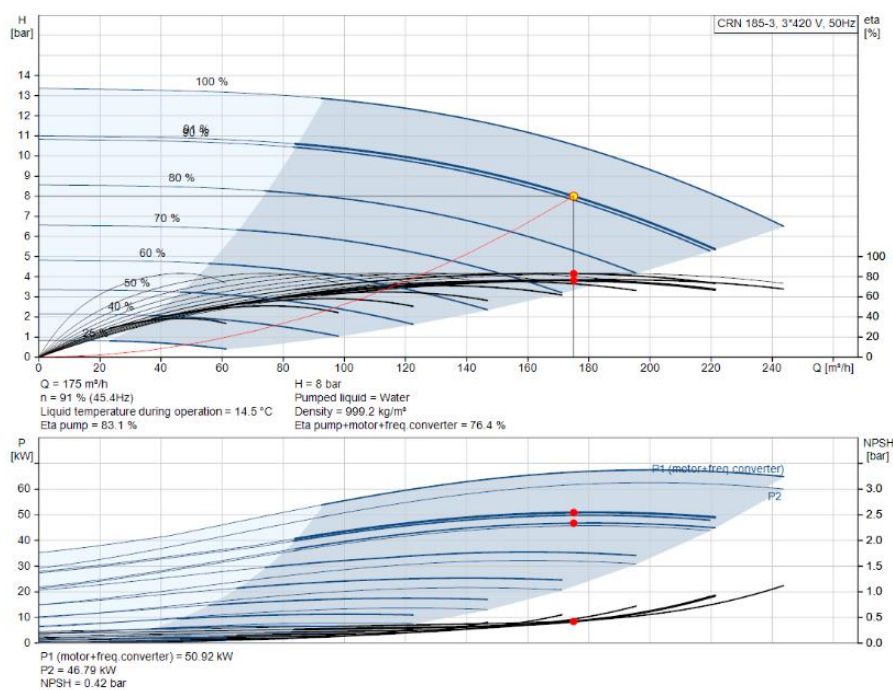
Slika 31. Karakteristika pumpe P7

Potrebno je odabrati pumpu za dovod ultračiste vode koja će pokriti potrebe miješanog filtra, odnosno savladati tlak 3 bar u koji su uključeni linijski i lokalni gubici od spremnika RO permeata do sustava s miješanim filtrima uz protok 178,8 m³/h. Odabrana je vertikalna višestupanjska centrifugalna pumpa CR 215-1-1 od nehrđajućeg čelika (EN 1.4401).



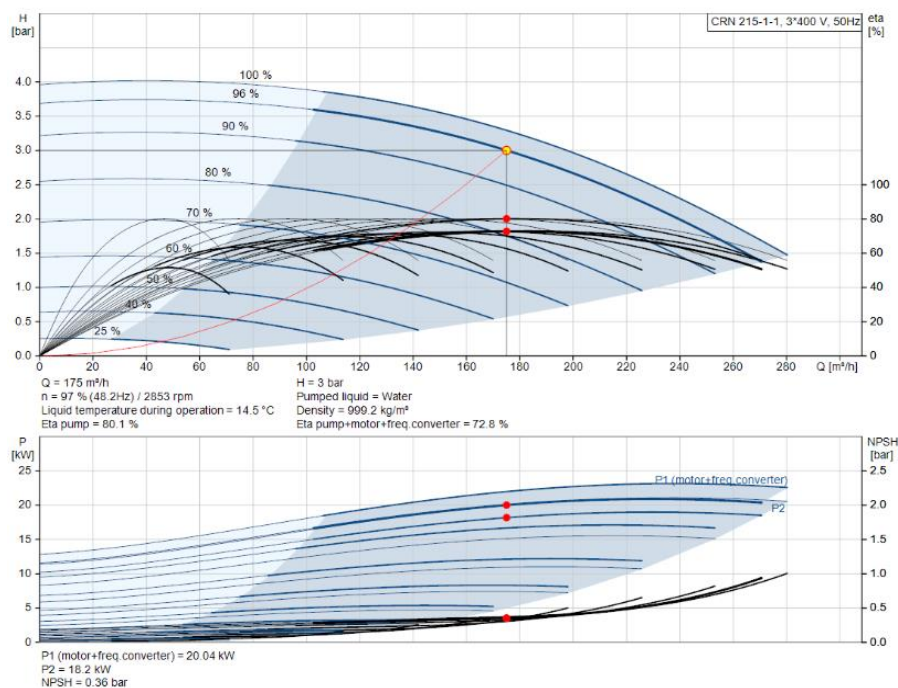
Slika 32. Karakteristika pumpe P10

Nakon miješanog filtra tok vode usmjeren je prema UV reaktorima, membranskim otplinjivačima i sustavu ultrafiltracije. Odabire se pumpa koja će zadovoljiti potrebe UV reaktora i membranskih otplinjivača. Pritom se uzima u obzir da je maksimalni dopušteni tlak na ulazu u UV reaktor 10 bar, a na sustavu membranskih otplinjivača 7,2 bar. Protok na ulazu u UV reaktore je $175 \text{ m}^3/\text{h}$. Odabrana je vertikalna višestupanjska centrifugalna pumpa CRN 185-3 od nehrđajućeg čelika (EN 1.4401).



Slika 33. Karakteristika pumpe P11

Konačno, prije zadnjeg prolaza u ultrafiltracijski sustav, dodaje se još jedna pumpa koja će osigurati protok vode kroz membrane do uporabnih mjesta u proizvodnji. Ulazni tlak u ultrafiltracijski sustav mora biti barem 1,37 bar. Prema proračunu u računalnom programu, pad tlaka na membranama ultrafiltracijskog sustava je 0,5, odnosno izlazni tlak je 0,87 bar. To još nije dovoljno da se osigura protok ultračiste vode do proizvodnje. Stoga se odabire vertikalna višestupanjska centrifugalna pumpa CR 215-1-1 od nehrđajućeg čelika (EN 1.4401). Visina dobave joj je 3 bar što znači da je osigurana dobava u proizvodnju za ispiranje poluvodičkih proizvoda.



Slika 34. Karakteristika pumpe P12

3.6. Utrošak energije

U ovom projektnom zadatku potrebno je prikazati utrošak energije potrebne za proizvodnju ultračiste vode. Proračun potrošnje energije djelomično je napravljen u računalnom programu Wave gdje su proračunati utrošci za procese kojima se voda dovodi do najviše moguće kvalitete. Također, uzete su u obzir pumpe za dovod vode koje značajno pridonose ukupnom utrošku energije.

U tablici niže prikazana je potrošnja energije po jednoj smjeni na vrhuncu rada ionskih izmjenjivača, modula reverzne osmoze, miješanog filtra i modula ultrafiltracije.

Tablica 17. Prikaz potrošnje energije procesa obrade vode

| Proces | kWh/dan |
|-------------------------------------|---------|
| Ionski izmjenjivač (umekšavanje) | 446,96 |
| Reverzna osmoza | 7749 |
| Miješani filter | 513,03 |
| Ultrafiltracija | 229,37 |

Ukupna potrošnja energije za procese obrade vode je:

$$E_{UK,P} = 8938 \text{ kWh/dan} , \quad (116)$$

Također, potrebno je pokazati potrošnju energije UV reaktora. Iz podataka od proizvođača Trojan Technologies za odabrani UV reaktor, poznato je da je snaga jedne UV lampe 155 W. U jednom reaktoru se nalazi 44 UV lampe, a odabrano je ukupno 6 reaktora koji obrađuju ultračistu vodu. Prema tome, potrošnja energije za redukciju ukupnog organskog ugljika je:

$$E_{UV} = 44 \cdot 155 \text{ W} \cdot 6 \cdot 16 \text{ h}, \quad (117)$$

što iznosi 654,72 kWh/dan.

U tablici niže je prikazana potrošnja energije pumpi za vodu.

Tablica 18. Prikaz potrošnje energije pumpi

| Pumpa | kWh/dan |
|-------|---------|
| P1 | 53,776 |
| P2 | 5,888 |
| P5 | 1804,8 |
| P6 | 1804,8 |
| P7 | 9,664 |
| P10 | 327,52 |
| P11 | 814,72 |
| P12 | 320,64 |
| P13 | 530,56 |

Ukupna potrošnja energije pumpi je:

$$E_p = 5672,368 \text{ kWh/dan}, \quad (118)$$

Sada je moguće odrediti ukupnu potrošnju u postrojenju, ne uzimajući u obzir sustav upravljanja i opremu koja nije projektirana:

$$E_{UK} = E_{UK,Pr} + E_{UV} + E_p \quad (119)$$

Utrošak energije prikazan je na mjesečnoj i godišnjoj bazi:

Tablica 19. Utrošak energije postrojenja po periodima

| Period | MWh |
|----------|---------|
| Dnevno | 15,27 |
| Mjesečno | 457,95 |
| Godišnje | 5571,76 |

4. ZAKLJUČAK

Cilj diplomskog rada bio je dati idejno rješenje za pripremu ultračiste vode u industriji poluvodiča kapaciteta 175 m³/h koja zadovoljava parametre relevantnih standarda kao najčišća voda u industriji. Ovisno o kvaliteti vode na raspolaganju, voda mora biti podvrgnuta nizu tehnoloških procesa kako bi se mogla koristiti za razne postupke ispiranja prilikom proizvodnje poluvodičkih elemenata. Definiranjem kvalitete vode prema ASTM standardu, teorijskom analizom tehnoloških procesa obrade vode te provedenim proračunom, ovaj rad daje temeljno razumijevanje važnosti ultračiste vode u industriji poluvodiča. Proveden je detaljan proračun ionskih izmjenjivača i membranskih sustava korištenjem računalnog programa Wave, uzimajući u obzir specifičnosti industrije i zadane parametre opreme. Konkretno, projektirano postrojenje sastoji se od četiri ionska izmjenjivača za umekšavanje vode, sustava reverzne osmoze u dva prolaza, četiri ionska izmjenjivača, odnosno miješana filtra, sustava za UV oksidaciju ukupnog organskog ugljika, dva sustava membranskih otplinjivača, sustava ultrafiltracijskih membrana i svih pripadajućih spremnika za prihvat kemikalija te redundantnog sustava s istom količinom opreme. Analizirani su troškovi kemikalija i potrošnja energije radi prikaza održivosti i ekonomske isplativosti predloženog postrojenja. Na kraju, tehnološka shema i tlocrtni prikaz opreme daju konkretan uvid izvedbe predloženog postrojenja.

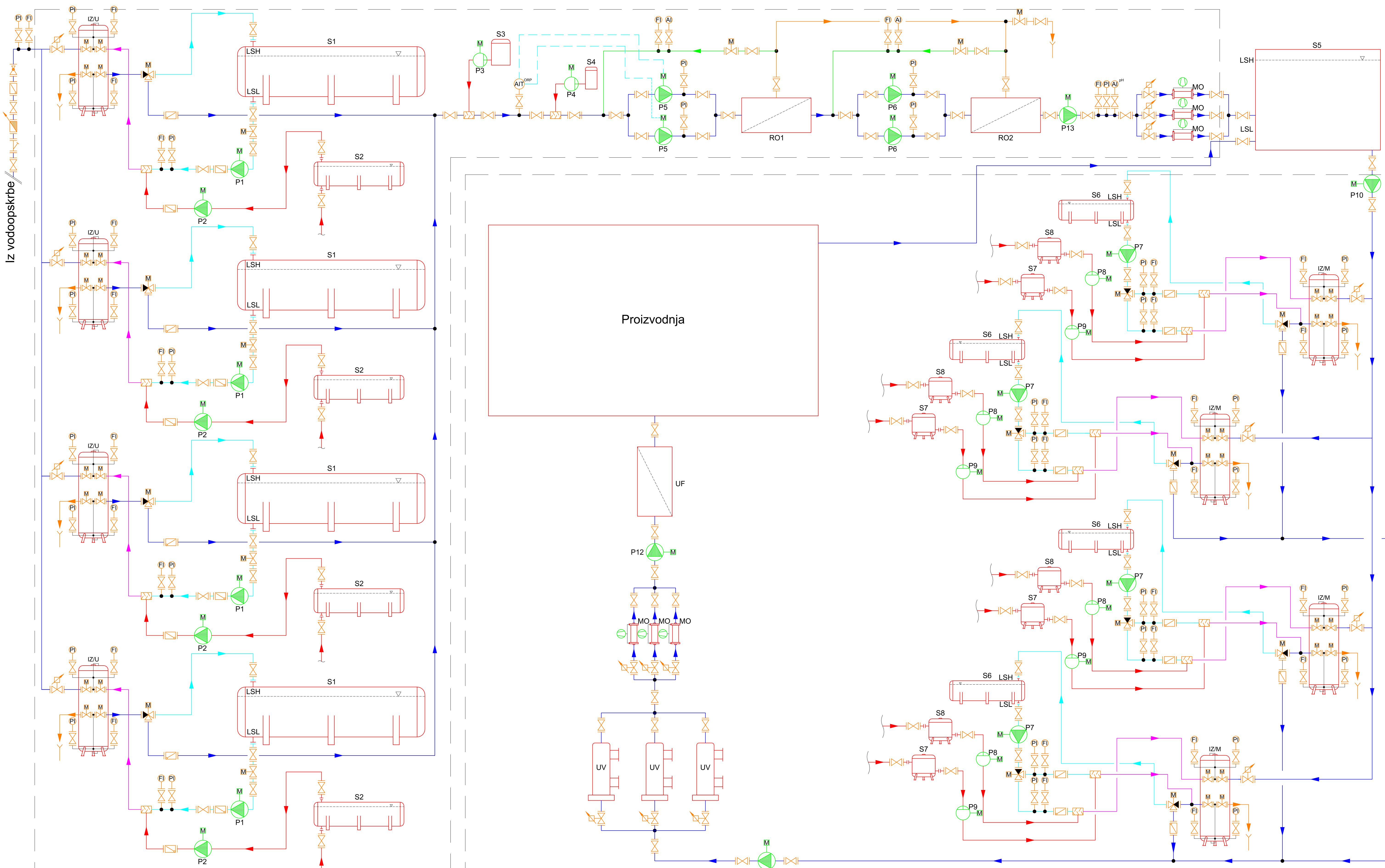
LITERATURA

- [1] H. Juretić, S. Dobrović, D. Ljubas, Podloge za predavanja iz kolegija Voda, gorivo i mazivo, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2022.
- [2] <https://www.britannica.com/science/water>; pristupljeno: 15.11.2023.
- [3] ASTM D5127 – 07, Standard Guide for Ultra-Pure Water Used in the Electronics and Semiconductor Industries, 2007.
- [4] MKS Instruments Handbook, MKS Instruments, Inc., Massachusetts, 2017.
- [5] V. Soldo, L. Boban, Podloge za predavanja iz kolegija Mehaničke operacije, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2022.
- [6] V. Koharić, Mehaničke operacije, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1996.
- [7] N. P. Hankins, R. Singh, Emerging Membrane Technology for Sustainable Water Treatment, Elsevier, Amsterdam, 2016.
- [8] R. Singh, Hybrid Membrane Systems for Water Purification: Technology, Systems Design and Operations, Elsevier, Amsterdam, 2006.
- [9] <http://delta-enviro.com/product-3.html>; pristupljeno: 15.11.2023.
- [10] <https://www.appliedmembranes.com/inge-dizzer-xl-series-ultrafiltration-modules.html?SID=09ca4e26d861a7db2649e1f2b70143d2>; pristupljeno: 15.11.2023.
- [11] <https://www.snowpure.com/technologies/membrane-degassing-technology-liqui-cel/>; pristupljeno: 15.11.2023.
- [12] <https://www.snowpure.com/products/electrodeionization/>; pristupljeno: 15.11.2023.
- [13] <https://www.trojantechnologies.com/en/applications/industrial/toc-reduction>; pristupljeno: 15.11.2023.
- [14] Dupont tehnički priručnik, obrazac br. 45-D01569-en, Rev. 10, Delaware, 2022.
- [15] Tehnički list proizvoda 3M Liqui-Cel EXF-14x28, Rev. 04, Charlotte, 2021.
- [16] Dupont tehnički priručnik, obrazac 45-D01127-en, Rev. 3, Delaware, 2020.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

Primarna obrada vode



LEGENDA SIMBOLA

| | | | |
|-------------------|--|-------------------------------------|--|
| VAKUUM PUMPA | | REDUCIRAJUĆI VENTIL | |
| INDIKATOR PROTOKA | | VODOMJER | |
| INDIKATOR TLAKA | | ZAPORNI VENTIL | |
| INDIKATOR pH | | NEPOVRATNI VENTIL | |
| ORP INDIKATOR | | PUMPA | |
| | | HVATAČ NEČISTOĆA | |
| | | PROLAZNI MOT. VENTIL | |
| | | TROPUTNI MOT. VENTIL | |
| | | STATIČKI MJESAČ | |
| | | PROLAZNI MOT. VENTIL S REG. PROTOKA | |

LEGENDA

| | |
|--|------------------------------------|
| | PROČIŠĆENA VODA |
| | VODA ZA REGENERACIJU |
| | VODA ZA REGENERACIJU S KEMIKALIJOM |
| | KEMIKALIJA |
| | RECIRKULIRANA VODA |
| | SIGNALI |

OPIS OZNAKA

| | |
|------|---|
| IZ/U | IONIŠKI IZMJEŃIVAČ - UMEKŠAVANJE |
| IZ/M | IONIŠKI IZMJEŃIVAČ - MJESAŃI FILTAR |
| S1 | SPREMNIK UMEKŠANE VODE V = 90 000 L |
| S2 | SPREMNIK 30% NATRIJEVA KLORIDA V = 25 000 L |
| S3 | SPREMNIK 30% NATRIJEVA BISULFITA V = 1000 L |
| S4 | SPREMNIK ANTISKALANTA V = 3500 L |
| S5 | SPREMNIK DEMINERALIZIRANE VODE V = 180 000 L |
| S6 | SPREMNIK ULTRACISTE VODE ZA REGENERACIJU MJESAŃANOG FILTRA V = 25 000 L |
| S7 | SPREMNIK 98% SUMPORNE KISELINE V = 1500 L |
| S8 | SPREMNIK 30% NATRIJEVA HIDROKSIDA V = 10 000 L |
| RO1 | MODUL PRVOG PROLAZA REVERZNE OSMOZE |
| RO2 | MODUL DRUGOG PROLAZA REVERZNE OSMOZE |
| MO | MEMBRANSKI OTPLJUNIVAČ TIP: AQUAFINE AVANT 44 |
| UV | UV REAKTOR |
| UF | MEMBRANSKI MODUL ULTRAFILTRACIJE |
| P1 | PUMPA GRUNDFOS NBE 65-200/219 |
| P2 | PUMPA GRUNDFOS CR 5-2 |
| P3 | PUMPA GRUNDFOS DDC 6-10 |
| P4 | PUMPA GRUNDFOS CR 255-4-2 |
| P5 | PUMPA GRUNDFOS CRN 185-6 |
| P6 | PUMPA GRUNDFOS DDE 60-10 |
| P7 | PUMPA GRUNDFOS DME 375 10AR |
| P8 | PUMPA GRUNDFOS CR 215-1-1 |
| P9 | PUMPA GRUNDFOS CRN 185-3 |
| P10 | PUMPA GRUNDFOS CR 215-1-1 |
| P11 | PUMPA GRUNDFOS CR 215-2-2 |
| P12 | PUMPA GRUNDFOS CR 215-1-1 |
| P13 | PUMPA GRUNDFOS CR 215-2-2 |
| LSH | SKLOPKA VISOKE RAZINE |
| LSL | SKLOPKA NISKE RAZINE |

Proizvodnja

Poliranje kvalitete vode

SCADA

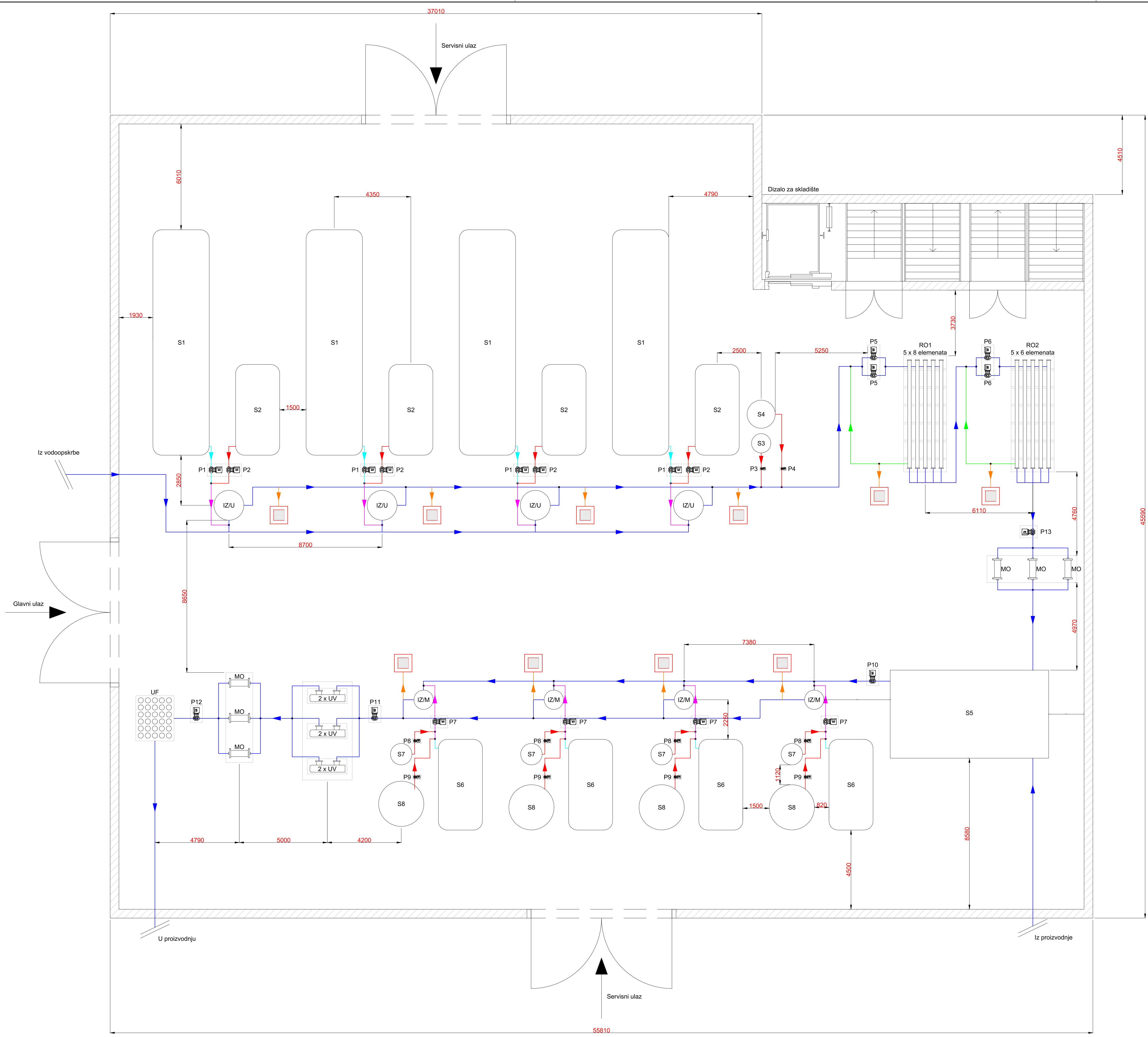
Napomena:
Svi uređaji za upravljanje su povezani SCADA sustavom za automatsku regulaciju

| | | | | |
|-------------------|-------------|-----------------------------------|-----------|--------------|
| Projektirao | 25.11.2023. | Bruno Horvat, bacc. ing. mech. | Potpis | |
| Razradio | 25.11.2023. | Bruno Horvat, bacc. ing. mech. | | |
| Crtao | 25.11.2023. | Bruno Horvat, bacc. ing. mech. | | |
| Pregledao | 25.11.2023. | lev. prof. dr. sc. Hrvoje Jurešić | | |
| Objekt: | | | | Objekt broj: |
| Napomena: | | | | R. N. broj: |
| Materijal: | Masa: | | | Kopija |
| Mjerilo originala | Naziv: | TEHNOLOŠKA SHEMA | pozicija: | Format: A 1 |
| | Crtež broj: | | | Listova: 1 |
| | | | | List: 1 |

| LEGENDA | |
|---------|------------------------------------|
| | PROČIŠĆENA VODA |
| | VODA ZA REGENERACIJU |
| | VODA ZA REGENERACIJU S KEMIKALIJOM |
| | KEMIKALIJA |
| | RECIRKULIRANA VODA |

OPIS OZNAKA

| | |
|------|---|
| IZ/U | IONSKI IZMJENJIVAČ - UMEŠAVANJE |
| IZ/M | IONSKI IZMJENJIVAČ - MJEŠANI FILTAR |
| S1 | SPREMNIK UMEKŠANE VODE V = 90 000 L |
| S2 | SPREMNIK 26% NATRIJEVA KLORIDA V = 25 000 L |
| S3 | SPREMNIK 30% NATRIJEVA BISULFITA V = 3500 L |
| S4 | SPREMNIK ANTISKALANTA V = 180 000 L |
| S5 | SPREMNIK DEMINERALIZIRANE VODE V = 180 000 L |
| S6 | SPREMNIK ULTRAČISTE VODE ZA REGENERACIJU MJEŠANOG FILTRA V = 25 000 L |
| S7 | SPREMNIK 98% SUMPORNE KISELINE V = 1500 L |
| S8 | SPREMNIK 30% NATRIJEVA HIDROKSIDA V = 10 000 L |
| RO1 | MODUL PRVOG PROLAZA REVERZNE OSMOZE |
| RO2 | MODUL DRUGOG PROLAZA REVERZNE OSMOZE |
| MO | MEMBRANSKI OTPLINJIVAČ TIP: 3M LIQUI-CEL EXF 14x28 |
| UV | UV REAKTOR TIP: AQUAFINE AVANT 44 |
| UF | MEMBRANSKI MODUL ULTRAFILTRACIJE |
| P1 | PUMPA GRUNDFOS NBE 65-200/219 |
| P2 | PUMPA GRUNDFOS CR 5-2 |
| P3 | PUMPA GRUNDFOS DDC 6-10 |
| P4 | PUMPA GRUNDFOS DDC 6-10 |
| P5 | PUMPA GRUNDFOS CR 255-4-2 |
| P6 | PUMPA GRUNDFOS CR 255-4-2 |
| P7 | PUMPA GRUNDFOS CRN 185-6 |
| P8 | PUMPA GRUNDFOS DDE 60-10 |
| P9 | PUMPA GRUNDFOS DME 375 10AR |
| P10 | PUMPA GRUNDFOS CR 215-1-1 |
| P11 | PUMPA GRUNDFOS CRN 185-3 |
| P12 | PUMPA GRUNDFOS CR 215-1-1 |
| P13 | PUMPA GRUNDFOS CR 215-2-2 |



| | | | | |
|-------------------|-------------|-----------------------------------|--------|--|
| Projektirao | Datum | Ime i prezime | Potpis | |
| Razradio | 25.11.2023. | Bruno Horvat, baoc. ing. mech. | | |
| Crtao | 25.11.2023. | Bruno Horvat, baoc. ing. mech. | | |
| Pregledao | 25.11.2023. | Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Jurešić | | |
| Objekt: | | Objekt broj: | | |
| Napomena: | | R. N. broj: | | |
| Materijal: | | Masa: | | |
| Mjerilo originala | | Naziv: | | |
| 1:100 | | TLOCRT POSTROJENJA | | |
| Crtaj broj: | | Format: A1 | | |
| | | Listova: 1 | | |
| | | List: 1 | | |