

# Upotreba vode u rashladnim sustavima termoenergetskih postrojenja

---

**Semren, Marija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*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:235:705570>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-11**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Marija Semren**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Davor Ljubas, dipl. ing.

Student:

Marija Semren

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem mentoru na velikoj pomoći te svojim najbližima: Duki, Ruki, Mate, Saki, najljepša Pupu, Bart, Dora, Sandra, Glogs i Titanik curke.

Marija Semren



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i 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 / 22 – 6 / 1        |        |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -           |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marija Semren**

JMBAG: **0035213073**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Upotreba vode u rashladnim sustavima termoeenergetskih postrojenja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Water use in cooling systems of thermal power plants**

Opis zadatka:

Voda i energija usko su povezani. Električna energija ne može se kontinuirano proizvoditi u termoeenergetskim postrojenjima (uz korištenje goriva kao što su ugljen, prirodni plin, mazut, biomasa) te u nuklearnim postrojenjima bez korištenja vode za hlađenje. Voda se također koristi i u brojnim tehnološkim procesima u kojima je moguće iskoristiti i/ili proizvesti energiju. Istovremeno je zahvaćanje vode s nekog izvorišta, njezin tretman do potrebne kvalitete te njezina distribucija do mjesta gdje je potrebna povezano s potrošnjom energije. Ova ovisnost često se naziva spona voda- energija (*engl.* water-energy nexus) i sve se više ističe kao važno područje za proučavanje u kojemu se može učiniti mnogo na povećanju održivosti okoliša kao i za buduće planiranje i sigurnost opskrbe vodom.

Rashladni vodni sustavi za termoeenergetska postrojenja mogu biti koncipirani na različite načine (protočni, zatvoreni recirkulacijski i otvoreni recirkulacijski), no u svakome od njih tijekom korištenja dolazi do onečišćenja ili zagađenja vode. Onečišćena voda može dovesti do većih ili manjih poteškoća u rada sustava hlađenja: korozija, mikrobiološko zagađenje i sustava i okoliša, taloženje mulja i kamenca i dr. Stoga je potrebno kontrolirati sastav (kvalitetu) vode i tretirati je povremeno ili kontinuirano kako bi se omogućio normalan (projektiran) rad sustava.

U okvirima ovog završnog rada potrebno je proučiti i prikazati rad najčešćih rashladnih vodnih sustava u termoeenergetskim postrojenjima, danas dostupne tehnološke postupke za postizanje tehnički i mikrobiološki prihvatljivog sastava (tj. kvalitete) rashladne vode te načine trajnog održavanja kvalitete takve vode. Pri tome je potrebno izraditi materijalne i energetske bilance različitih tehnoloških postupaka i razvrstati ih prema učinkovitosti.

Posebnu pažnju potrebno je posvetiti slučajevima mikrobiološkog zagađenja vode patogenim bakterijama roda *Legionella* te postupcima koje je potrebno primijeniti u slučaju detekcije tih bakterija u rashladnoj vodi. Također, prilikom izrade rada potrebno je navesti sve dostupne propise i stručne preporuke koji su primjenjivi u postupcima postizanja i održavanja kvalitete rashladne vode na razini Republike Hrvatske i Europske unije. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

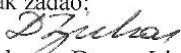
Predviđeni datumi obrane:


30. 11. 2021.

1. rok: 24. 2. 2022.  
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.  
3. rok: 22. 9. 2022.

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.  
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.  
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Davor Ljubas

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

# SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| SADRŽAJ .....  | 5  |
| POPIS SLIKA.....   | 8  |
| POPIS TABLICA .....  | 9  |
| SAŽETAK .....  | 10 |
| SUMMARY .....  | 11 |
| 1. UVOD.....   | 12 |
| 2. SPONA VODA-ENERGIJA (engl. <i>Water – energy nexus</i> ).....         | 13 |
| 2.1. Općenito.....   | 13 |
| 2.2. Budućnost i zeleno trošenje vode .....                              | 14 |
| 3. HLAĐENJE .....  | 16 |
| 3.1. Rashladni sustavi .....   | 17 |
| 3.1.1. Suhi sustav hlađenja.....   | 17 |
| 3.1.2. Protočni sustav hlađenja (engl. <i>once-trough cooling</i> )..... | 18 |
| 3.1.3. Recirkulacijski (optočni) sustav hlađenja .....                   | 19 |
| 3.1.3.1. Rashladni tornjevi .....  | 21 |
| 3.2. Proces hlađenja .....   | 29 |
| 3.2.1. Osnovne bilance.....  | 29 |
| 3.2.1.1. Bilanca mase .....  | 29 |
| 3.2.1.2. Bilanca topline .....   | 30 |
| 4. TRETMAN I OČUVANJE RASHLADNE VODE .....                               | 33 |
| 4.1. Očuvanje energije .....   | 33 |
| 4.1.1. Uštede u prijenosu topline .....                                  | 33 |
| 4.1.2. Uštede u održavanju.....  | 35 |
| 4.1.3. Uštede novim sistemima.....                                       | 35 |

|   |    |
|---|----|
| 4.2. Tretman rashladne vode.....  | 35 |
| 4.2.1. Problemi protočnih sustava.....  | 35 |
| 4.2.2. Problemi otvorenih recirkulacijskih sustava.....                             | 36 |
| 4.2.2.1. Proračun koncentracijskih ciklusa .....                                    | 37 |
| 4.2.2.2. Ograničenja broja koncentracijskih ciklusa .....                           | 38 |
| 4.2.3. Problemi zatvorenih recirkulacijskih sustava .....                           | 39 |
| 4.3. Svrha tretmana rashladne vode .....  | 39 |
| 4.4. Osnovni principi tretmana.....   | 40 |
| 4.4.1. Kamenac .....  | 40 |
| 4.4.1.1. Uklanjanje elemenata koji tvore kamenac .....                              | 40 |
| 4.4.1.2. Dodavanje tvari.....   | 41 |
| 4.4.2. Korozija.....  | 41 |
| 4.4.3. Začepljenja/ Naslage.....  | 42 |
| 4.4.3.1. Sprječavanje začepljenja uslijed naslaga .....                             | 43 |
| 4.5. Mikrobiološko zagađenje i tretmani .....                                       | 45 |
| 4.5.1. Mikroorganizmi u rashladnim tornjevima .....                                 | 46 |
| 4.5.1.1. Bakterije.....   | 46 |
| 4.5.1.2. Alge.....  | 47 |
| 4.5.1.3. Gljivice.....  | 48 |
| 5. <i>LEGIONELLA PNEUMOPHILA</i> .....  | 50 |
| 5.1. Oblici bolesti.....  | 50 |
| 5.2. Zagađenje rashladnih tornjeva bakterijom <i>Legionella</i> .....               | 51 |
| 5.3. Tretmani uklanjanja zagađenja <i>Legionellom</i> u rashladnim tornjevima ..... | 52 |
| 5.3.1. Biocidni tretmani .....  | 52 |
| 5.3.1.1. Oksidirajući tretmani .....  | 52 |

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 5.3.1.2. Neoksidirajući tretmani..... | 54 |
| 5.3.1.3. Disperzivni tretmani.....    | 55 |
| 5.3.2. UV Zračenje.....               | 55 |
| 6. UTJECAJ NA OKOLIŠ.....             | 56 |
| 7. LEGISLATIVA .....                  | 58 |
| 8. ZAKLJUČAK.....                     | 61 |
| LITERATURA .....                      | 62 |



## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 1. Shema protočnog rashladnog sustava .....   | 19 |
| Slika 2. Shema otvorenog recirkulacijskog sustava.....                                    | 20 |
| Slika 3. Shema zatvorenog recirkulacijskog sustava .....                                  | 21 |
| Slika 4. Atmosferski rashladni toranj [6] .....   | 23 |
| Slika 5. Hiperbolični rashladni toranj [6] .....  | 24 |
| Slika 6. Hiperbolični rashladni toranj, TE Heilbronn, SR Njemačka (Foto: D. Ljubas) ..... | 25 |
| Slika 7. Rashladni toranj sa suprotnim tokom[6].....                                      | 27 |
| Slika 8. Osnovna shema rashladnog sustava TEP [8].....                                    | 29 |
| Slika 9. Pojednostavljena shema zrak-voda[8] .....  | 30 |
| Slika 10. H-x dijagram hlađenja vode [8].....   | 31 |

## **POPIS TABLICA**

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1. Talози природног и умјетног поријекла [9] .....                               | 34 |
| Tablica 2. Postotci vrsta taloga u rashladnoj vodi [9].....                              | 45 |
| Tablica 3. Vrste bakterija [9] .....   | 46 |
| Tablica 4. Vrste algi [9] .....  | 48 |
| Tablica 5. Vrste gljivica [9] .....  | 49 |
| Tablica 6. Granične vrijednosti onečišćujućih tvari za rashladne otpadne vode [14] ..... | 59 |

## SAŽETAK

Dobivanje energije zahtijeva određeni trošak vode i obrnuto. Potrebno je optimizirati taj omjer i poveznicu kako bi se omogućila dugotrajna isplativost procesa proizvodnje energije. U radu termoenergetskog postrojenja potrebno je odvoditi višak topline kako bi se osigurao nesmetan rad postrojenja. Rashladna voda, kao najpovoljniji i najčešće korišten rashladni medij, ima veliku ulogu i važnost u procesu hlađenja. Pravilna priprema, obrada i korištenje rashladne vode ključni su u postizanju optimalne proizvodnje električne energije. Izvedbe rashladnih sustava, odabrani tretmani vode te održavanje optimalnih radnih uvjeta postrojenja, izazovi su s kojima se svako termoenergetsko postrojenje susreće. Cjelokupni proces ima određeni utjecaj na okoliš koji je raznim propisima i zakonima zaštićen od prekomjernog iskorištavanja i narušavanja ekosustava.

Ovaj rad prikazuje važnost poveznice vode i energije, proces funkcioniranja raznih rashladnih sustava termoenergetskih postrojenja, zakonske propise utjecaja istih na okoliš te tehnološke procese postizanja zadovoljavajućih tehničko-biokemijskih uvjeta kvalitete rashladne vode. Posebno je naglašen utjecaj i sanacija slučajeva pojave bakterije *Legionella* u rashladnoj vodi.

**Ključne riječi:** spona voda-energija, rashladni sustav, rashladna voda, tretman vode, *Legionella*

## **SUMMARY**

Energy production comes at an expense of water and vice versa. It is a necessity to optimize that link as to ensure a payoff in the long run of the energy generation process. It is necessary to take away the excess heat from the operating power plant so that the plant can operate without any disruptions. Cooling water, the most often selected medium for cooling, has a significant role and importance in the cooling process. The proper preparation, treatment and use of cooling water are truly crucial for the optimal generation of electrical energy. Cooling system arrangements, treatments of cooling water and maintaining satisfactory levels of water quality are all frequent problems that every power plant encounters and tackles. The whole process has a certain environmental impact that must be in accordance with regulations, as to prevent overuse and destroying of the ecosystem.

This paper presents the importance of water-energy link, functioning processes of different cooling systems, laws limiting the impacts of the process on the environment and treatments bringing cooling water to satisfactory bio-chemical and technical standards. The effects and sanitization of the water regarding occurrence of the bacteria of the *Legionella* genus is especially emphasized.

**Key words:** water-energy nexus, cooling system, cooling water, water treatment, *Legionella*

## 1. UVOD

Pojam električne energije u jednu ruku postao je istoznačnica riječi ugodnost, čak i nužnost.

Proizvodnja ove, u jednu ruku, osnovne potrepštine za suvremeni život, kompleksan je i zanimljiv proces u kojem u današnje doba glavnu riječ vode termoenergetska postrojenja. U procesu dobivanja električne energije velika je uloga vode i time se nameće sve više tema za razgovore na konvencijama i sastancima o ekonomičnijem korištenju vode u energetske sektoru. Ova međusobna ovisnost energije i vode naziva se spona voda-energija (engl. water – energy nexus) i jedan je od glavnih fokusa kretanja prema tzv. zelenijoj proizvodnji električne energije.

Za neometan rad termoenergetskih postrojenja potrebno je odvoditi nusproizvode u obliku krutog, kapljevito i plinovito otpada i otpadne topline. Kako bi se što učinkovitije odvodila otpadna toplota, tijekom povijesti su se razvile razne izvedbe rashladnih sustava prilagođavajući se dostupnim količinama vode i sve višoj osviještenosti o utjecaju termoenergetskih postrojenja na okoliš. Uz razne tehničke podjele rashladnih sustava, ne može se izostaviti pojam koji je u središtu rashladnog procesa i o kojem ovisi učinkovitost postrojenja, a to je rashladna voda. Odgovarajuća priprema i tretman vode, jednom kad je u postrojenju, ključni su za dugotrajni rad postrojenja na najvišoj razini učinkovitosti. Voda, crpljena iz prirodnih izvora, donosi sa sobom cijeli ekosustav u svom fizikalno-biokemijskom sastavu koji nije kompatibilan s potrebnim radnim uvjetima u energetske postrojenjima. Usljed te činjenice rashladna se voda provodi kroz niz tretmana kako njen sastav ne bi štetno djelovao na postrojenje.

U okviru ovog završnog rada biti će objašnjena međuovisnost vode i energije, rad raznih rashladnih sustava s vodom te postupci kojima se dezinficira rashladna voda, s posebnim naglaskom na utjecaj patogenih bakterija roda *Legionella*. Dodatno, navest će se i pripadajući propisi koji su povezani s navedenom tematikom.

## **2. SPONA VODA-ENERGIJA (engl. *Water – energy nexus*)**

U današnjem vremenu sve većeg porasta energetske potražnje, gotovo je neizbježno spomenuti usku vezu vode i energije. U proizvodnji energije (primarno električne energije i topline), važnost korištenja vode u primarno rashladne svrhe zrcali se u važnosti korištenja energije u svrhu dobave, prijenosa i obrade vode za proizvodnju energije. Drugim riječima: koliko je bitno osigurati dostatne količine vode za hlađenje postrojenja, toliko je bitno optimizirati omjer dobivene energije iz istog postrojenja i energije utrošene na osiguravanje rashladne vode. Stoga sve veće i bitnije pitanje glasi : Kako uskladiti dobitke proizvoda i gubitke resursa te kako optimizirati cjelokupni proces u vidu tehnoloških, ekonomskih te socijalnih boljitaka?

### **2.1. Općenito**

„Čista voda i sanitacija“ („clean water and sanitation“) i „pristupačna i čista energija“ („affordable and clean energy“) su dva od 17 ciljeva održivog razvoja predloženih od strane UN-a 2016.godine [1]. Voda i energetske resursi usko su povezani jer su velike količine energije potrebne za crpljenje, dobavu, transport, grijanje i hlađenje, obradu i recikliranje vode, dok se voda koristi za proizvodnju energije u obliku pare za pokretanje turbina te kao rashladni medij u termoelektranama. Postoji šest međusobno povezanih aspekata upravljanja vodom i energijom: institucionalni, regulatorni, tehnološki, financijski, društveni i ekološki [1]. Sa tehnološkog stajališta, razvoj naprednih tehnologija kao što su energetske učinkovito pročišćivanje vode, uključivanje informacijskih i komunikacijskih tehnologija, upravljanje i recikliranje otpadnih voda, itd. je od ključne važnosti za postizanje održive proizvodnje i potrošnje vode i energije.

Ključno je odrediti kako se mogu zadovoljiti svjetske potrebe za električnom energijom, a istovremeno smanjiti potrošnju vode u energetskom sektoru. Isto tako, vrlo je bitno razumjeti i navesti glavna opterećenja i potrošače svjetskih zaliha vode te primijeniti strategije za smanjivanje crpljenja vodnih zaliha. Otisak termoenergetskih postrojenja (TEP) na vodene zalihe se najčešće analizira iz perspektive crpljenja i potrošnje vode. Naime, crpljena voda je definirana kao ukupna količina vode uzeta iz izvora vode u svrhe hlađenja, dok potrošnja vode predstavlja razliku između crpljene vode i vode koja se vrati u izvor (mogući gubici putem isparavanja) [2].

Količina vode korištena u svjetskog proizvodnji energije iznosi oko 10% ukupne crpljene vode iz svjetskih prirodnih izvora, dok količina potrošene vode iznosi oko 3% ukupne svjetske potrošnje vode. U SAD-u i sjevernoj Europi oko 50%, a u Kini skoro 84% crpljene vode se koristi za

proizvodnju energije, primarno u rashladne svrhe. Očekivan je porast od 55% svjetske potražnje za vodom do 2050. god. u usporedbi s onima iz 2000. godine [1]. Uzimajući u obzir sve brže klimatske promjene, nameće se pitanje opskrbe vodom u područjima gdje ona više neće biti dostupna u istim količinama.

## **2.2. Budućnost i tzv. zeleno trošenje vode**

Korištenje vode u TEP-ima može se procijeniti pomoću više parametara, najčešći od kojih bi bio volumni vodni otisak koji uključuje izravno korištenje (korištenje vode za hlađenje na lokaciji TEP-a) i neizravno korištenje vode (uzvodno korištenje vode u lancu opskrbe gorivima ili opremom). Volumni otisak vode definiran je volumenom vode koja je iskorištena od strane potrošača ili proizvođača u cijelom opskrbnom lancu. U posljednjih nekoliko godina ovaj koncept je proširen s mjerenja same količine korištene vode na mjerenje i potencijalnih utjecaja na okoliš. Ovaj pristup orijentiran na okolišni utjecaj dodatno razmatra regionalizirane pokazatelje učinka kao dio tradicionalnih okvira procjene učinka. Iako su obje metode korištene u opisivanjima rezultata studija o potrošnji vode u proizvodnji električne i termalne energije, većina postojećih studija daje prednost korištenju samo volumena korištene vode [2].

Provedeno istraživanje u članku iz 2019. g. koristeći Geografski Informacijski Sustav (GIS) metodu pokazuje kako je 55,5% svjetskih termalnih postrojenja locirano unutar 5 km udaljenosti od najvećih svjetskih rijeka pa se pretpostavlja da su hlađena slatkovodnim izvorima. Dalje, 11,1% toplinskih postrojenja imaju nepoznati izvor vode za hlađenje, dok se 33,4% postrojenja nalazi unutar 20 km od morske obale pa se za njih pretpostavlja da koriste morsku vodu u svojim rashladnim sustavima. Cilj istraživanja je bio pokazati ovisnost smanjenja količine potrošene i crpljene vode o primjeni tehnoloških rješenja kroz prijelazno vrijeme. Istraživanje je pokazalo kako su, od strane energetskeg sektora, najopterećenije rijeke Tennessee, Mississippi i Yangtze. Kao primjer najugroženije rijeke navodi se Dunav, na kojemu je otkriven vodni otisak 63 TEP-ova lociranih u 7 država (Njemačka, Austrija, Slovačka, Srbija, Mađarska, Rumunjska i Bugarska) i sume kapaciteta od 18,04 GW [2].

Kako je prije objašnjeno, delikatna veza između rashladnih sustava TEP-ova i mogućnosti proizvodnje električne i termalne energije može biti znatno ugrožena incidentima nestašice vode, raznim regulacijskim zaprekama i konkurentnim ekološkim problemima. Mnogi napisani radovi pozivaju na žurne reforme u trenutnim rashladnim procesima, točnije, na instaliranje rashladnih

sustava koji koriste manje vode i nalaženje novih načina za iskorištenje otpadne vode. Neki radovi svjesno ignoriraju učinke klimatskih promjena na mogućnosti i učinkovitost rada TEP-a u svojim početnim pretpostavkama, dok ih neki znanstvenici pokušavaju uključiti u svoje analize: do te mjere da su čak i predloženi inovativni postupci reformiranja i prilagođavanja energetskog sektora s obzirom na klimatske promjene. Jedan istraživački tim fokusira svoje istraživanje na jedan fiktivni TEP koji koristi protočni sustav hlađenja u centralnoj Europi. Predviđen je pad od 11.8% na godišnjem radnom opterećenju TEP-a i, u najgorem slučaju, gubitak od 100 milijuna eura godišnje. Druga pak istraživanja daju općenitiji pregled na utjecaj klimatskih promjena na energetski sektor. Njihovi rezultati pokazuju da bi se ljetni kapaciteti TEP-ova u Europi i SAD-u trebali smanjiti za maksimum od 19%, odnosno za maksimum od 16% (ovisno o korištenom sustavu opskrbe vode i odabranom klimatskom scenariju od 2031. do 2060.). U usporedbi, i kao svojstveni odgovor na navedene primjere istraživanja, koja su isključivo simulacijske prirode, neki radovi objavljeni 2011. prikazuju rezultate sa empirijske točke gledanja. Koristeći dostupne podatke za analizu mogućih utjecaja klimatskih promjena na nuklearnu industriju, iznesen je zaključak da porast od 1 °C prosječne temperature okoliša povlači za sobom pad od oko 0,5% u proizvedenoj energiji nuklearnog postrojenja [3].



### 3. HLAĐENJE

TEP-ovi zagrijavaju vodu kako bi dobivena para mogla pokretati turbine koje naposljetku pokreću električne generatore u kojima se proizvodi električna energija. Potrebna toplina za zagrijavanje vode dobiva se putem izgaranja goriva, nuklearnim reakcijama ili izravno putem sunčeve energije ili geotermalnih izvora pod zemljom. Nakon što para jednom prođe kroz turbinu, mora se ponovno ohladiti i kondenzirati nazad u kapljevitu vodu prije ponovnog korištenja za pokretanje turbine. Upravo hlađenje pare obavlja se rashladnim sistemima koji danas pretežito koriste vodu. Hladnija rashladna voda bolje hladi paru te daje bolju toplinsku učinkovitost. Današnja najčešća goriva energetske postrojenja su ugljen, nuklearno gorivo, prirodni plin i mazut, a za pogon postrojenja mogu se koristiti i obnovljivi izvori: solarna energija, geotermalna energija i biomasa.

Količina hlađenja potrebna za neki TEP s parnim ciklusom (zadanih energetske kapaciteta) određena je njezinom toplinskom i električnom učinkovitošću i u suštini nije povezana s vrstom goriva koje postrojenje koristi. Ali za usporedbu mogu se uzeti stupnjevi učinkovitosti nuklearne elektrane i elektrane na ugljen. Nuklearne elektrane, trenutno u pogonu, često imaju veću toplinsku učinkovitost od elektrane na ugljen: kod elektrane na fosilna goriva dio ispuštene topline nalazi se u dimnim plinovima. Kod velikih postrojenja oko 15% otpadne topline prolazi kroz dimnjak, dok se u nuklearnoj elektrani gotovo sva otpadna toplina mora odvoditi rashladnom vodom kondenzatora. Ova činjenica dovodi do određene razlike u potrošnji ili korištenju vode između dva postrojenja. Osim toga, ako zanemarimo samu veličinu TEP-a, sve razlike između postrojenja su posljedica toplinske učinkovitosti, koja uvelike ovisi o radnoj temperaturi generatora pare. Dodatno, zbog logistike goriva, nuklearne elektrane imaju veću lokacijsku fleksibilnost od ugljenih elektrana zbog koje su njihove geografske lokacije često određene uvjetima hlađenja u okolišu i mogućnostima izgradnje umjetnih rashladnih objekata. U Europi (osobito Skandinaviji) niska temperatura vode važan je kriterij prema kojem se pozicionira elektrana. Za planiranu nuklearnu elektranu u Turskoj, ako se postrojenje nalazi na obali Crnog mora kojem je prosječna temperatura niža za 5 °C u usporedbi sa Sredozemnim morem, moguće je povećanje proizvedene električne energije od 1% [4].

Prema izvješću Ministarstva energetike (DOE) iz 2006.g u SAD-u 43% TEP-ova koriste protočne sustave hlađenja, 42% koriste mokro recirkulacijsko hlađenje, 14% rashladna jezera i 1% suho hlađenje (odnosi se samo na plinski kombinirani ciklus). Ovi postotci se mogu primijeniti za

centralnu Europu i Rusiju, dok sve nuklearne elektrane u Ujedinjenom Kraljevstvu, Švedskoj, Kanadi, Japanu, Južnoj Koreji i Kini koriste protočne sustave hlađenja. IAEA (International Atomic Energy Agency) objavila je brojeve prema kojima 45% nuklearnih postrojenja koriste more za protočne sustave hlađenja, 15% ih koristi jezera, 14% rijeke i 26% koriste rashladne tornjeve. Postrojenja s kombiniranim ciklusom (plinske turbine s kombiniranim ciklusom – CCGT) trebaju oko jednu trećinu potrebne količine hlađenja običnog TEP-a. Ova činjenica stoji zbog velike količine topline koja se oslobađa u plinskoj turbini što otvara mogućnost hlađenja manje učinkovitim suhim sustavom hlađenja [4].

### **3.1. Rashladni sustavi**

Izvori vode za sustave opskrbe vodom za termoenergetska postrojenja su rijeke, jezera ili mora (uvelike ovisno o kapacitetu samog tijela vode i lokaciji termoenergetskog postrojenja). Od ovih, najčešće se koriste rijeke kao primarni izvor vode za različite sustave hlađenja prema raspoloživosti srednjeg protoka vode. Današnje izvedbe sustava hlađenja dijele se na: suhe, protočne, i recirkulacijske (zatvorene/otvorene). U slijedećim poglavljima biti će objašnjeni principi rada svakog od navedenih sustava.

#### **3.1.1. Suhi sustav hlađenja**

Ako je pristup vodi ograničen ili su ekološki i estetski zahtjevi više na popisu prioriteta, odabire se suhi sustav hlađenja koji, kao što ime implicira, koristi zrak kao medij za odvod viška topline bez da se oslanjanju na fiziku isparavanja.

Manji postotak elektrana se hladi ovim rashladnim sistemom. Naime, suhi sustavi hlađenja koriste zrak umjesto vode za hlađenje pare na izlazu iz turbine te tako smanjuju ukupnu potrošnju u elektrani za više od 90% [5]. Negativna strana ovakve uštede vode su veći troškovi pogona i niža učinkovitost. Niža učinkovitost znači povećane količine goriva po jedinici proizvedene električne energije te tako može dovesti do većeg onečišćenja zraka i negativnog utjecaja na okoliš uslijed rudarenja, obrade i transporta goriva. U 2000. g. većina ovakvih sustava u pogonu bili su dio manjih elektrana, najčešće u elektranama s kombiniranim ciklusom na prirodni plin. Ovakva izvedba može uključivati rashladne tornjeve sa zatvorenim krugom ili induciranim protokom zraka. Dizajn koji koristi prisilni protok zraka kroz rebrasti sklop radi na istom principu kao automobilski hladnjak te se još naziva „izravno suho hlađenje“. Velike količine zraka, u obliku propuha, prolaze

kroz sustav cijevi u kondenzatoru. Ovim cijevima teče para koja jednostavno konvekcijom predaje toplinu okolnoj struji zraka. Na ovaj način cijelo postrojenje koristi samo jednu desetinu vode koja bi inače bila potrebna za hlađenje mokrim sustavom hlađenja. Zauzvrat, oko 1-1,5% električne energije koje postrojenje proizvodi koristi se za pokretanje velikih ventilatora potrebnih za stvaranje prisilnog propuha [4]. Iako spadaju pod kategoriju „suhog“ hlađenja, rashladni tornjevi sa zatvorenim krugom ipak koriste određenu količinu vode. Međutim, sva rashladna voda nalazi se u zatvorenom cirkulacijskom krugu i odvojena u potpunosti od zraka koji još uvijek služi kao primarni rashladni medij. Neki rashladni tornjevi uključuju hibridne izvedbe koje ugrađuju odjeljak suhog hlađenja povrh mokrog dijela rashladnog sustava. Način rada i koji dio se više koristi za hlađenje, uvelike ovisi o godišnjem dobu: suho hlađenje se preferira tijekom hladnijih mjeseci.

U oba slučaja nema ovisnosti o isparavanju, a time ni gubitaka rashladne vode. Korištenje ventilatora također omogućuje veću kontrolu nad hlađenjem od oslanjanja jednostavno na prirodni propuh. Međutim prijenos topline je osjetno manje učinkovit i stoga zahtijeva mnogo veće, mehanički složenije i skuplje mehaničko postrojenje [4].

Ako je moguća izvedba mokrog rashladnog sustava i rashlađivanje korištenjem isparivanja uvijek će imati prednost nad suhim rashladnim sustavom. Pošto je u ovom završnom radu fokus na rashladnoj vodi i rashladnim sistemima koji koriste vodu, neće se detaljnije ulaziti u logistiku rada suhog sustava hlađenja.

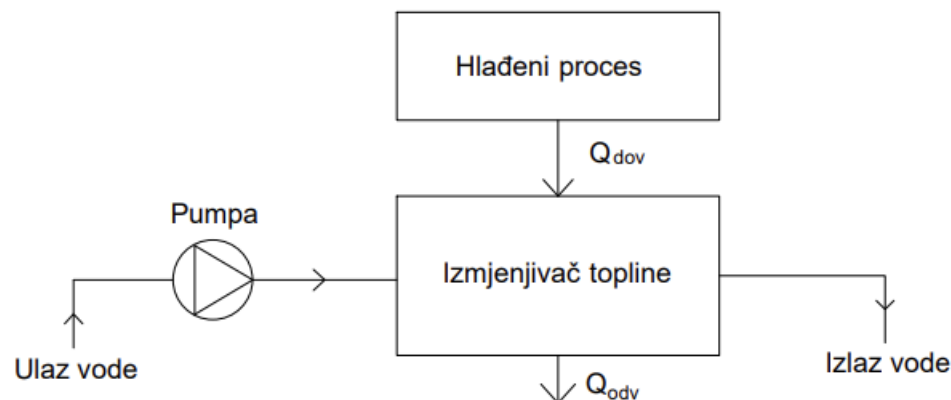
### ***3.1.2. Protočni sustav hlađenja (engl. once-trough cooling)***

Protočni sustavi hlađenja uzimaju vodu iz obližnjih izvora (npr. rijeka, jezera, mora), cirkuliraju ju kroz sustav cijevi kako bi se apsorbirala toplina iz pare u kondenzatorima te ju ispuštaju, sada pri povišenoj temperaturi, nazad u lokani izvor. U ovakvim slučajevima potrošnja vode na mjestima crpljenja i ispuštanja vode gotovo je zanemariva iako postoje određeni gubici zbog hlađenja i isparavanja zagrijane vode u daljnjem otjecanju i miješanju s izvornom vodom. Mnoge nuklearne elektrane koriste ovaj sustav hlađenja upravo zbog jednostavne izvedbe, niske cijene i visokog stupnja učinkovitosti rashladnog procesa. Trenutno su jako rasprostranjeni u istočnom SAD-u [5]. Međutim, vrlo malo novih elektrana koristi protočni sustav hlađenja zbog poremećaja koje uzrokuju u lokalnim ekosustavima uslijed značajnog crpljenja vode i narušavanja biokemijskog sastava lokalnog izvora. Korištenje morske vode zahtijeva kvalitetnije materijale pri

izradi kako bi se najbolje spriječila korozija. Trošak skupljih materijala obično se isplati kako je jedno francusko istraživanje 2008.g pokazalo da će postrojenje koje se hladi rijekom imati 0,9% smanjene izdatke i povećanu cijenu kWh za 3%, što bi značilo da je sustav hlađenja morem obično učinkovitiji od svoje riječne inačice [4].

Svaka nuklearna ili elektrana na ugljen koja se hladi protočnim sustavom imat će ograničenja na temperaturu povratne vode i/ili temperaturnu razliku između ulaza i ispusta. U vrućim ljetnim uvjetima ulazna temperatura ulazne vode može se približiti graničnoj vrijednosti za ispuštanje, uzrokujući uvjete u kojima postrojenje ne može raditi punom snagom.

Ponekad se kao nadopuna sustavu koristi i dodatni rashladni toranj zbog kojeg se izvedba može definirati kao dvostruki sustav gdje se primarni dio hlađenja odvija putem protočnog sustava, a naknadno rashlađivanje preko rashladnog tornja [4]. Nažalost ovo znači da se dio vode gubi putem isparavanja.



Slika 1. Shema protočnog rashladnog sustava

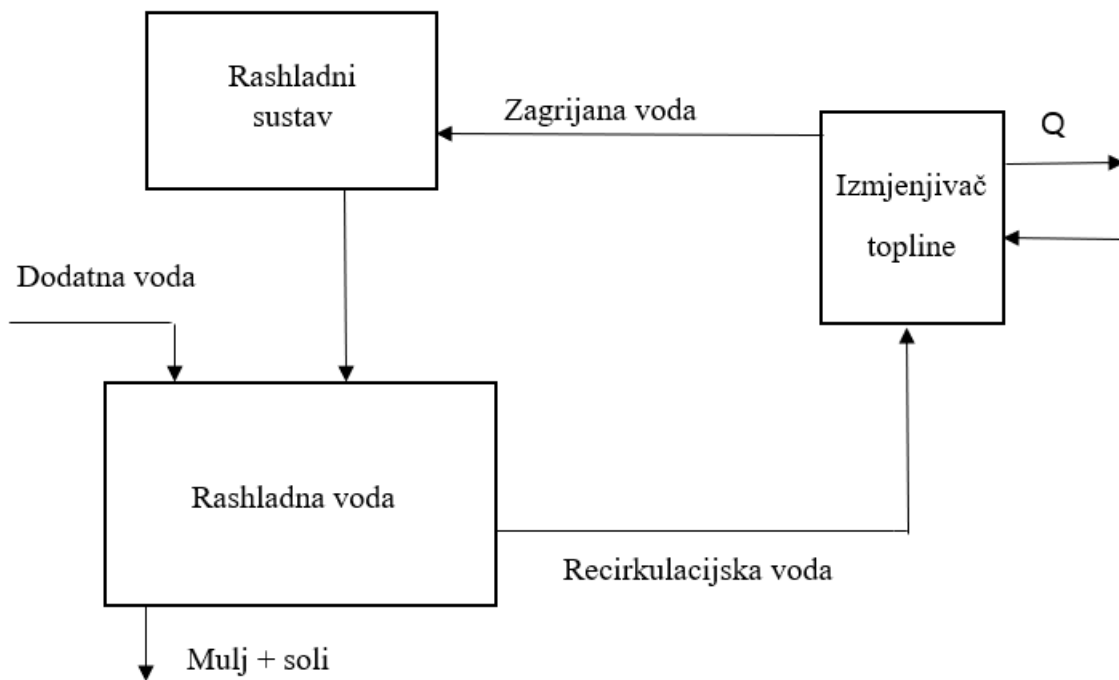
### 3.1.3. Recirkulacijski (optočni) sustav hlađenja

Tamo gdje nisu dostupne količine vode za izvedbu protočnog sustava hlađenja, TEP-ovi ispuštaju otpadnu toplinu putem zraka koristeći recirkulacijske sustave hlađenja s vodom, oslanjajući se pretežito na proces isparavanja vode. Većina TEP-ova s recirkulacijskim hlađenjem hlade se vodom u kondenzatorskom krugu iz kojeg topla voda ide u rashladni toranj. Gubici nastali zbog hlađenja vode u rashladnim tijelima pokriveni su manjim količinama vode pa ovakav sustav ima značajno manji utjecaj na kemijsko-biološki sastav izvornog tijela vode. Nadalje, zbog povoljnijeg

utjecaja na okoliš i strogih propisa o zaštiti okoliša i ekosustava u prirodnim izvorima vode, ovakav sustav se primjenjuje tamo gdje je moguće i, toplinski učinkovitiji, protočni sustav hlađenja TEP-a. Uz mogućnost samostalnog pogona ovog sustava, on se izvodi i kao dopuna protočnom sustavu (kombinirani). Razlika između otvorenih i zatvorenih recirkulacijskih sustava je ta da kod otvorenih sustava zrak koji hladi vodu dolazi u direktan kontakt s vodom, dok je u zatvorenim sustavima kondenzirana voda u potpunosti odvojena od zraka.

Glavne komponente otvorenog recirkulacijskog rashladnog sustava su:

- Hlađeni uređaji: kondenzatori, izmjenjivači topline, hladnjače, kompresori i ostali dijelovi TEP-a od kojih je potrebno odvoditi toplinsku energiju
- Jedan ili više rashladnih tornjeva: odvoje toplinu iz zagrijane, povratne vode iz TEP-a
- Jedna ili više crpki: crpe hladnu vodu prema hlađenim komponentama
- Cjevovodi

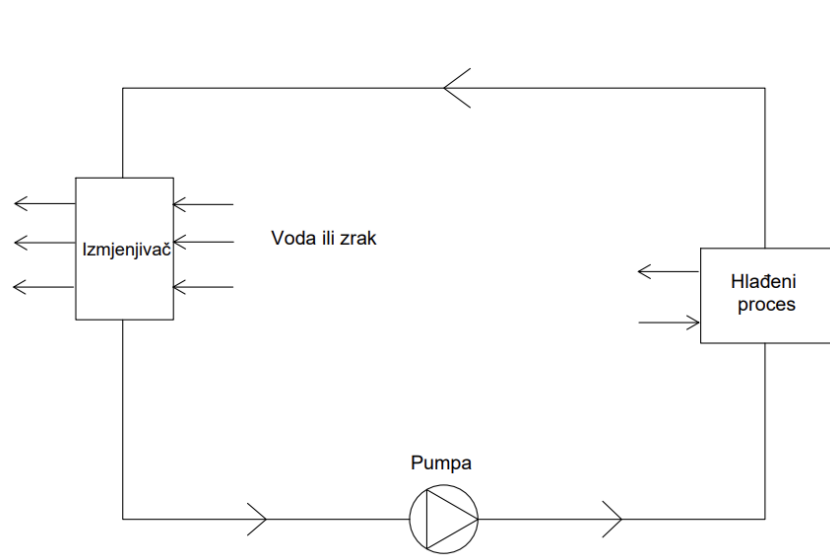


Slika 2. Shema otvorenog recirkulacijskog sustava

Zatvoreni recirkulacijski sustav sastoji se od dva termalno povezana sustava:

- „primarni“ (u potpunosti zatvoren) sustav: služi za cirkuliranje vode i odvođenje topline na izmjenjivačima topline
- „sekundarni“ sustav: služi za hlađenje zagrijane rashladne vode, često je otvorenog tipa ili se koristi zračno (suho) hlađenje

Lakše je održavanje zahtijevanih kemijskih uvjeta sastava vode u svim točkama cirkulacijskog kruga. Unatoč tome, negativna strana ovog sustava jest ta, da je ohlađena voda na relativno visokoj temperaturi što smanjuje toplinsku učinkovitost rashladnog sustava.



Slika 3. Shema zatvorenog recirkulacijskog sustava

### 3.1.3.1. Rashladni tornjevi

Većina tornjeva čiji će princip rada biti pobliže objašnjen u nastavku teksta su evaporativni tornjevi koji se temelje na principu isparavanja i/ili ishlapljivanja vode u kontaktu sa zrakom, no bitno je spomenuti i ostale izvedbe koje se neće pobliže objašnjavati.

#### Suhi rashladni tornjevi (dry cooling towers)

Suhi rashladni tornjevi u potpunosti koriste suhe zavojne površine za prijenos topline. Nema direktnog kontakta između vode i zraka koji ju hladi te stoga nema isparavanja i gubitaka vode pri hlađenju. Prenosi se samo osjetna toplina, pošto nema isparavanja nema izmjene latentne topline.

U području između suhих i mokrih rashladnih tornjeva nalaze se tornjevi sa reduciranom parnom perjanicom (plume abatement towers) i tornjevi za očuvanje vode (water conservation towers). Svaki zasebno koristi sve veće dijelove suhих zavojnih površina za prijenos topline, uklanjajući tako specifične probleme i/ili postižući određene tehnološke zahtjeve.

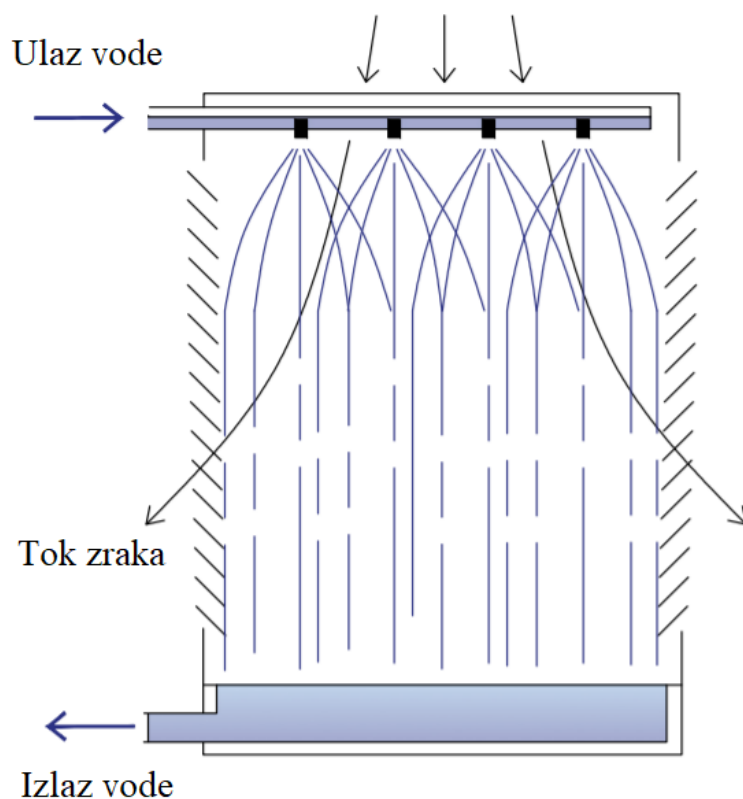
#### Evaporativni rashladni tornjevi (evaporative cooling towers)

Originalno su zamišljeni kao sustavi za očuvanje vode u postrojenju i tu funkciju ispunjavaju i dan danas sa sve rastućom učinkovitošću, gubeći samo 3-5% cirkulacijske vode u isparavanju, odnesenim vodenim kapljicama (drift) i otpadnoj vodi (blowdown). Većina TEP-ova s recirkulacijskim hlađenjem hlade se vodom u kondenzatorskom krugu iz kojeg topla voda ide u rashladni toranj. Hlađenje u tornju odvija se preko prijenosa topline s vode na zrak: konvekcijom i isparavanjem i/ili ishlapljivanjem. Uobičajena su vizualna značajka elektrana, izbacujući gustu perjanicu vodene pare [6].

Kod mokrih rashladnih tornjeva voda slobodno može cirkulirati, dok kod suhих ona kruži kroz sustav zatvorenih cjevovoda, u potpunosti odvojena od zraka. Suhi rashladni tornjevi gotovo da nemaju gubitaka vode uslijed isparavanja, dok se kod mokrih rashladnih tornjeva gubici vode isparavanjem moraju nadoknađivati. Nadalje, mokre tornjeve može se podijeliti i prema protoku zraka: tornjevi s prirodnim strujanjem zraka (atmosferski) i tornjevi s prisilnim strujanjem zraka.

#### Tornjevi s prirodnim strujanjem zraka (atmosferski tornjevi)

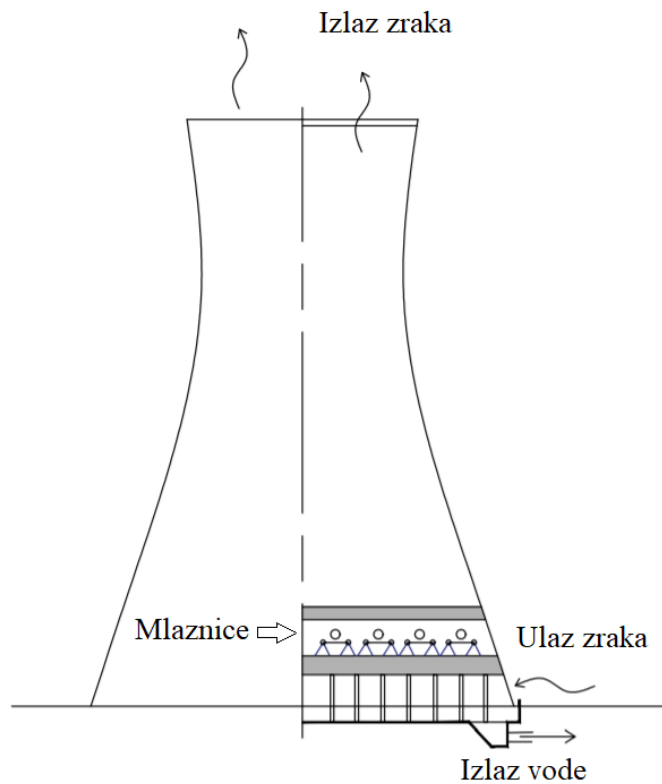
Kod rashladnih tornjeva s prirodnim strujanjem zraka koristi se efekt dimnjaka i ostvaruje se prirodni propuh bez ugradnje mehaničkog ventilatora. Zagrijana voda pada kroz toranj raspršena u sitne kapljice pri vrhu tornja preko tlačnih mlaznica te se hladi prirodno nastalom strujom zraka. Relativno jeftini, obično su manjih dimenzija od onih sa prisilnim strujanjem zraka te im je učinkovitost vrlo osjetljiva na promjene vanjskih uvjeta vjetra. Ne preporučaju se za procese koji zahtijevaju vrlo točne temperature rashladne vode.



*Slika 4. Atmosferski rashladni toranj [6]*

U kontrastu s gore navedenim tipom, tip tornja s prirodnim strujanjem zraka poznat kao hiperbolični toranj s prirodnim strujanjem zraka iznimno je pouzdan i predvidljive toplinske učinkovitosti, slika 5. i slika 6. Ovdje se protok zraka ostvaruje na principu različite gustoće između relativno zagrijanog zraka u tornju i hladnijeg okolnog zraka van tornja. Ovi tornjevi su tipično većih dimenzija dosežući do 150 m visine [6]. Njihovo ime dolazi od školjke tornja koja svojim oblikom slični hiperboli.





Slika 5. Hiperbolični rashladni toranj [6]

Iako su skuplji od ostalih oblika, ekstenzivno se koriste u energetsom području proizvodnje električne energije gdje su prisutna velika kondenzirana toplinska opterećenja i gdje dugi periodi amortizacije topline nadoknađuju odsustvo mehaničkog ventilatora i troška njegovog pogona. Najbolje funkcioniraju u vlažnijim klimama gdje veća relativna vlažnost zraka znatno pospešuje proces hlađenja.

Ovi tornjevi ne zahtijevaju ventilatore i imaju niske operativne, ali značajne investicijske troškove. Za veće TEP-ove njihova visina može doseći i do 200 m [4]. Koriste se u velikim nuklearnim elektranama i elektranama na ugljen po cijeloj Europi, istočnom SAD-u, Australiji i Južnoj Africi.



*Slika 6. Hiperbolični rashladni toranj, TE Heilbronn, SR Njemačka (Foto: D. Ljubas)*

### Tornjevi s prisilnim strujanjem zraka

Tornjevi s prisilnim strujanjem zraka koriste jedan ili više ventilatora kako bi stvorili kretanje određenog protočnog volumena zraka. Stoga njihova toplinska učinkovitost teži prema puno većoj stabilnosti i ovisi puno manje o varijabli relativne vlažnosti zraka. Prisutnost ventilatora isto omogućuje regulaciju protoka zraka i nadoknađivanje promjena vanjskih uvjeta. Prisilno strujanje se može podijeliti prema načinu dobivanja cirkulacije zraka: pretlačno i podtlačno.

Kod pretlačne cirkulacije zraka ventilator se nalazi u području gdje okolišni zrak ulazi u toranj te „gura“ zrak van. Za njih su karakteristične velike ulazne, a male izlazne brzine zraka. Veoma su podložni recirkulaciji zraka što im ruši stabilnost rada u odnosu na podtlačne sustave. Nadalje, pošto kroz njih struji hladan vanjski zrak, moguće je nastajanje jakog zaleđivanja ventilatora zbog prirodne ili dodane vlage u zraku. Obično su opremljeni centrifugalnim ispušnim ventilatorima koji, iako zahtijevaju puno više energije za pogon, imaju kapacitet savladati velike statičke tlakove koji se pojavljuju u kanalima tornja. Mogu se ugraditi u samom postrojenju ili u posebnom kućištu

van postrojenja, na dostatnoj udaljenosti od ispuha kako bi se što više smanjila mogućnost recirkulacije zraka.

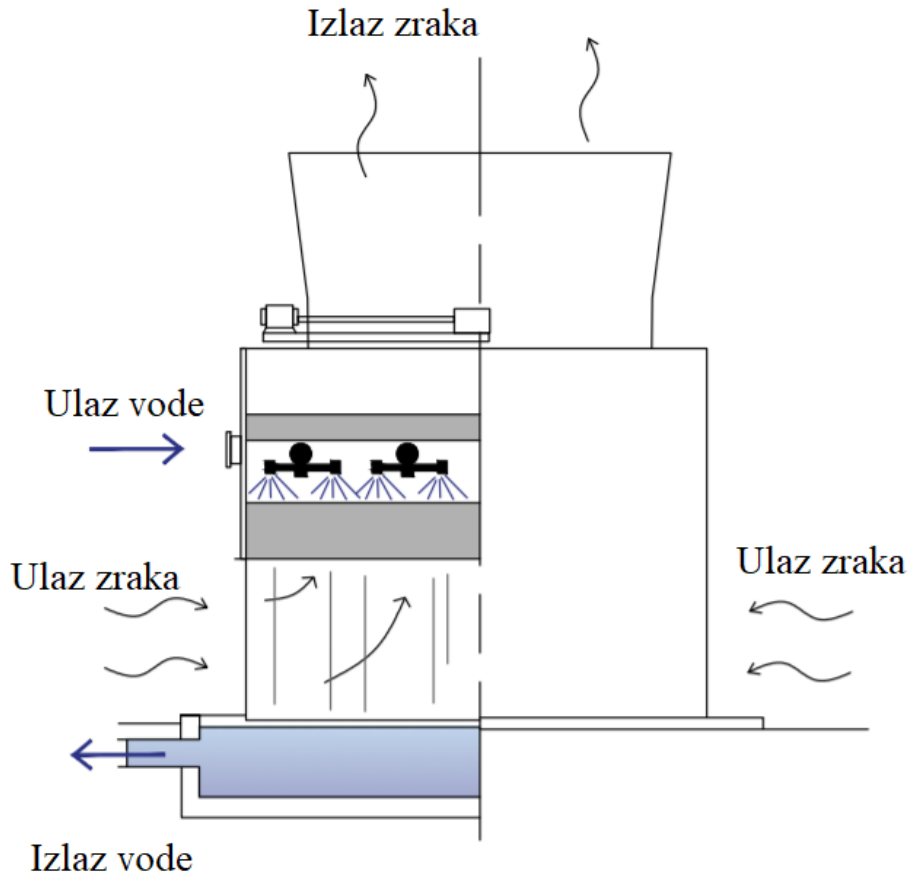
Podtlačni sustavi imaju izlaznu brzinu zraka 3 do 4 puta veću od ulazne brzine. Pojava recirkulacije nije sporadična i nekontrolirana te se jednostavno može kvantificirati na temelju uvjeta vjetra van tornja. Lokacija samog ventilatora (na vrhu tornja) i prolaz toplog zraka znatno smanjuju opasnost od pojavljivanja leda na mehaničkim komponentama.

Hibridni tornjevi estetski se mogu klasificirati kao tornjevi s prirodnim strujanjem zraka zbog relativno niskih visina tornjeva, dok su iznutra opremljeni mehaničkim ventilatorom koji ostvaruje funkciju prisilnog strujanja zraka. Primarni cilj ovakvih izvedbi jest smanjiti potrebnu količinu energije za pokretanje mehaničkog ventilatora i u isto vrijeme uštedjeti na visini tornjeva. Ovakvi tornjevi mogu raditi bez uključivanja ventilatora, a po potrebi se ventilator može uključiti (u sate najvećeg opterećenja).

Moguća je daljnja podjela prema smjeru strujanja zraka kroz toranj:

- suprotni tok (counterflow)
- poprečni tok (crossflow)

Kod tornjeva sa suprotnim tokom, zrak struji okomito prema gore kroz toranj nasuprot okomitom padanju čestica vode s vrha tornja. Zbog visokotlačnih sistema za raspršivanje vode, produljenih kanala za usis i izbacivanje zraka te većih gubitaka tlaka zraka, manji tornjevi sa suprotnim strujanjem zraka obično su izduženijeg oblika, potrebna im je jača pumpa i koriste veće snage ventilatora od sustava sa poprečnim tokom. U većim izvedbama ovih tornjeva korištenje niskotlačnih, gravitacijskih sustava distribucije i dostupnost velikih usisnih područja koje omogućuju bolju regulaciju zraka, ublažava navedene nedostatke. Zbog zatvorene prirode ovakvih sustava gdje je kontakt vode i sunčeve svjetlosti vrlo ograničen, postoji opasnost od razvijanja i rasta algi u tornju.



Slika 7. Rashladni toranj sa suprotnim tokom[6]

U konfiguracijama s poprečnim tokom zrak se kreće horizontalno kroz toranj pod kutem od  $90^\circ$  od okomitog smjera padanja vode. Voda koja ide na hlađenje nalazi se u spremnicima tople vode povrh tornja i raspršuje se u unutrašnjost tornja gdje ju, pri padanju na dno, strujanje vjetra hladi. Nakon prolaza, kondenzirana voda se nakuplja u donjim sakupljačkim otvorima. Dobro projektirani ventili za propuštanje zraka omogućuju djelomični pogon sustava što uvelike olakšava održavanje i čišćenje bez potpunog gašenja sustava. Tornjevi s poprečnim tokom se mogu još i podijeliti prema broju usisnih lokacija na tornju sa kojih ventilator povlaćiti zrak: jednoprotčni (single-flow) i dvoprotčni (double-flow). Kod jednoprotčne izvedbe opasnost od recirkulacije isključena je zbog u potpunosti zatvorene nasuprotne strane tornja.

Sastavni dijelovi rashladnog tornja:

Ispuna (fill) je najbitniji dio tornja. Služi za ravnomjernu distribuciju vode i povećanju dodirne površine vode i zraka za pospješivanje isparavanja. Ispuna može biti od raznih materijala: sekvoja, jela (prešana), plastika, keramička cigla te ispuna tzv. saće, slika 8 („saće“ ispuna postala je jako raširena u posljednje vrijeme. Sastoji se od gusto raspoređenih, valovitih ploča koje usmjeravaju vodu da cirkulira niz toranj u obliku vrlo tankog filma. Obično su od plastike: PVC se koristi za temperature vode do 55 °C, dok CPVC može izdržati temperature do 74 °C [7]).

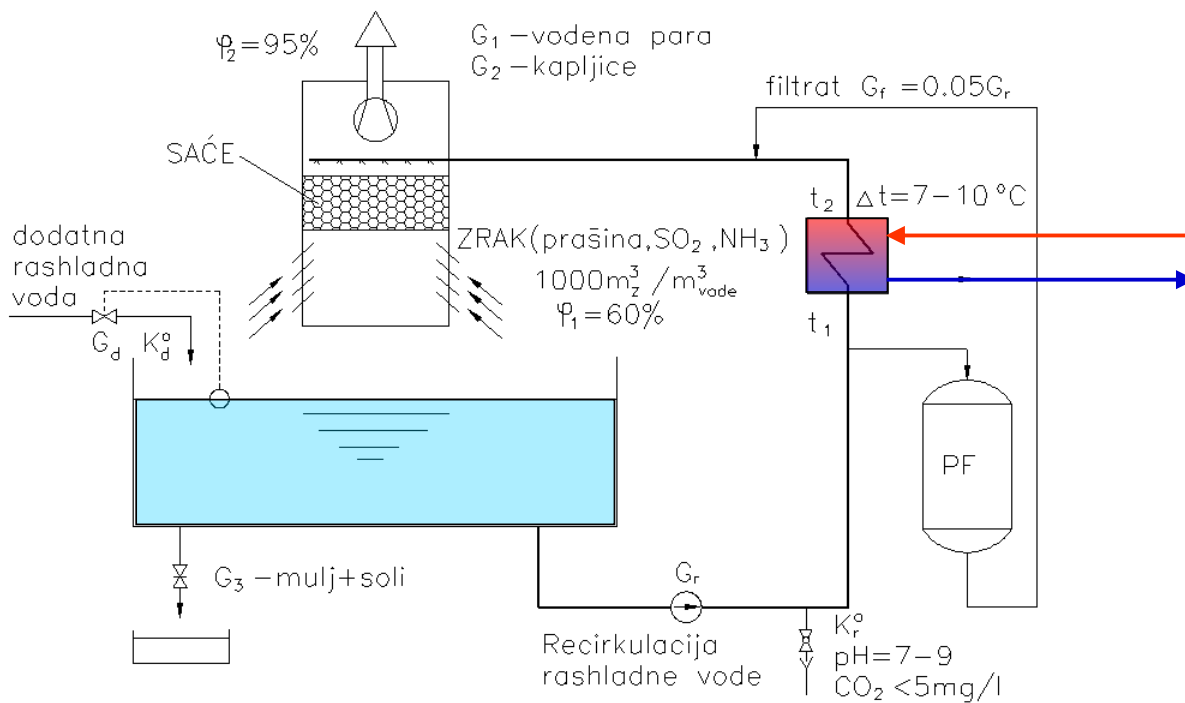
Rešetke se koriste za usmjeravanje strujanja zraka u tornju i minimiziranje gubitka vode zbog protoka zraka (voda odnesena vjetrom van tornja).

Eliminatori kapljica smanjuju količinu recirkulacijske vode zarobljene u zraku pri vrhu tornja (nije isto što i isparivanje). Eliminatori naglo mijenjaju smjer strujanja zraka, dajući centrifugalnu silu za odvajanje kapljica vode od zraka. Obično su izrađeni od plastike i dolaze u raznim oblicima [7].

Rashladni tornjevi dolaze i u dvije izvedbe što se tiče sastavljanja: na lokaciju TEP-a dostavljaju se i sastavljaju već izgrađene komponente tornja ili se već sastavljen (većinom) dostavlja na lokaciju TEP-a.

Raspored većeg broja tornjeva može se izvesti linearno ili kružno. Kružni raspored tornjeva može podnijeti veća toplinska opterećenja te je znatno manje podložan recirkulaciji, pri manjem zauzimanju površine od više redova linearnih sustava tornjeva.

## 3.2. Proces hlađenja



Slika 8. Osnovna shema rashladnog sustava TEP [8]

### 3.2.1. Osnovne bilance

#### 3.2.1.1. Bilanca mase

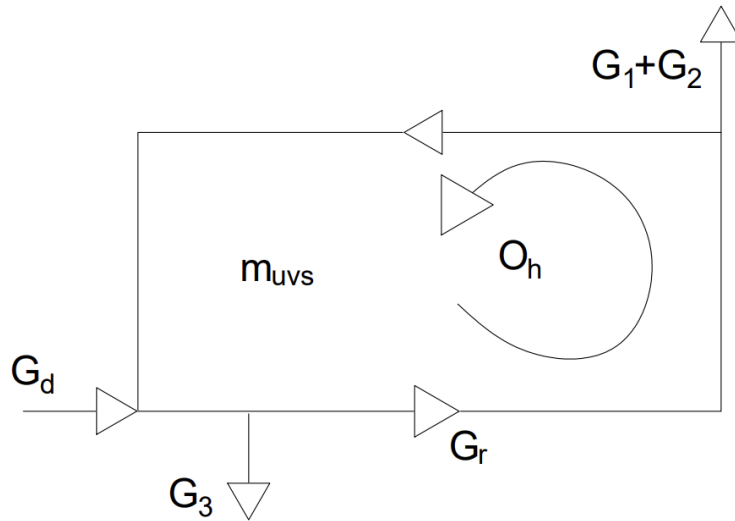
$$G_d = G_1 + G_2 + G_3 \quad [\text{kg/h}] \quad (1)$$

$G_d$  – potrebna količina dodatne rashladne vode za održavanje sustava u ravnoteži, [kg/h];

$G_1$  – masa isparene/ishlajene vode, [kg/h];

$G_2$  – masa rashladne vode koja je odnesena kapljicama, [kg/h];

$G_3$  – masa vode koju je potrebno odmuljivati (odsoljavati) radi održavanja koncentracije soli u dopuštenim granicama, [kg/h];



Slika 9. Pojednostavljena shema zrak-voda [8]

$$G_r = m_{uvs} * O_h \quad [kg/h]$$

$$G_d = G_1 + G_2 + G_3 \quad [kg/h]$$

$m_{uvs}$  – ukupna količina vode u sustavu, [kg];

$O_h$  - broj optoka u satu, [kg];

$G_r$  – kapacitet rashladne vode (protok), [kg/h];

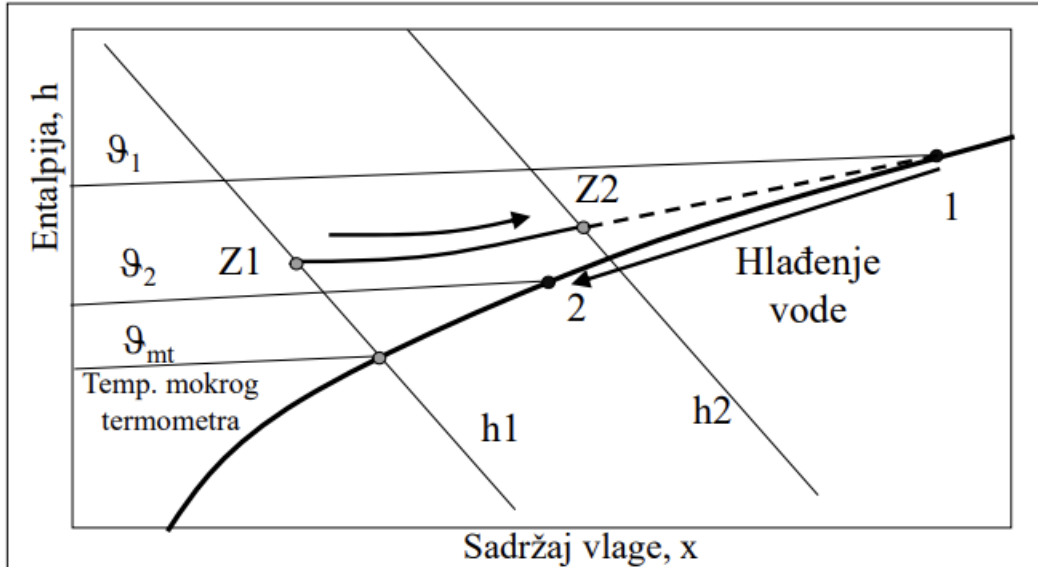
### 3.2.1.2. Bilanca topline

Toplina odvedena od vode po iznosu jednaka je toplini koja prijeđe na zrak:

$$c * G_v * (\vartheta_2 - \vartheta_1) = G_z * (h_{z2} - h_{z1})$$

$\vartheta_{1,2}$  – temperature vode, [°C];

$h_{z1,2}$  – specifične entalpije zraka, [J/kg];



Slika 10. H-x dijagram hlađenja vode [8]

$$Q = G_r * \Delta\vartheta * c \quad [kJ/h]$$

Masa vode koja je pri tome isparila:

$$G_1 = \frac{Q}{r} = \frac{(G_r * \Delta\vartheta * c)}{r} \quad [kg/h]$$

$r$  – specifična toplota isparavanja vode, [J/kg];

Masa vode odnesena u obliku kapljica:

$$G_2 \leq 0,001 * G_r \quad [kg/h]$$

Količina vode za odmuljivanje:

$$G_3 = \frac{1}{u-1} * G_1 = \frac{1}{u-1} * \frac{Q}{r} \quad [kg/h]$$

$u$  – uparenje: omjer koncentracija tvari u recirkulacijskoj vodi i dodatnoj vodi:

$$u = \frac{KT_r}{KT_d} = \frac{Cl_r^-}{Cl_d^-} = \dots \text{(optimalno) } 4 - 6 \text{ puta}$$

$$KT_r = 7 - 20^{\circ}nj$$



$$KT_d = 0,5 - 3^\circ nj$$

Uvrštavanjem izraza za pojedinačne članove  $G_{1,2,3}$  u izraz (1) dobije se jednačba za izračun potrebne količine dodatne rashladne vode:

$$G_d = \frac{Q}{r} * \left( 1 + \frac{0,001 * r}{\Delta\vartheta * c} + \frac{1}{u - 1} \right) \text{ [kg/h]}$$

[8]

## **4.TRETMAN I OČUVANJE RASHLADNE VODE**

### **4.1. Očuvanje energije**

Pošto je voda najčešći medij prijenosa topline u rashladnim sustavima, najočigledniji je i često najneposredniji izvor uštede energije koja se može ostvariti optimizacijom rashladnog kruga. Optimizacijski postupci prvo se primjenjuju na sustave otvorene recirkulacije s rashladnim tornjevima, ali mogu u potpunosti vrijediti i za protočne te zatvorene recirkulacijske rashladne sustave. Očuvanje vode znači i očuvanje energije u prvotnim tretmanima vode, pumpanju i tretmanu otpadne vode.

Trošak tretmana i pripreme vode za korištenje u TEP-u uvelike ovisi o podrijetlu same vode. Komunalne otpadne vode zbog najvećih postojećih nečistoća u pravilu zahtijevaju najskuplje tretmane [9]. U situacijama gdje imamo dostatan izvor vode koje ne treba neke zahtjevne tretmane, troškovi pumpanja i distribucije su dostatni za pokrivanje najekonomičnije situacije: jednom pročišćena voda može se ponovno koristiti.

Uštede u potrošnji vode ne tiču se samo dodatne rashladne vode koju trebamo dovoditi u TEP. Značajne uštede moguće su i u područjima bavljenja otpadnom vodom koja može zahtijevati određeni tretman prije ispuštanja nazad u okoliš. Također, potrebno je ostvariti uštede u područjima rukovanja i održavanja opreme za dobavu i kontrolu gdje troškovi mogu biti veći od očekivanih. Današnji sustavi poput daljinskog upravljanja s alarmom, automatizacija tretmana, itd.... omogućuju pouzdane postupke kontrole, analize i upravljanja rashladnim sustavima.

Osim navedenih, moguće su uštede korištenjem otpadne vode kao dodatne rashladne vode. Nakon prikladnih tretmana i dovođenja u zadovoljavajuće parametre, otpadna voda može se ponovno iskoristiti i smanjiti gubitke vode u postrojenju. Ovaj pristup se koristi u raznim postrojenjima diljem Europe i SAD-u i obećavajuće je područje za daljnja istraživanja, budući da se bavi i problemom nestašica vode[9].

#### ***4.1.1. Uštede u prijenosu topline***

Jedan od najvećih gubitaka energije u postrojenju je gubitak kapaciteta prijenosa topline rashladnog kruga. Događa se uslijed formiranja raznih taloga na izmjenjivačkim površinama. Osim smanjivanja izmjenjivačkog kapaciteta, talozi povisuju opterećenje na pumpe koje, u ekstremnim slučajevima, dovodi do obustave rada postrojenja kako bi se nakupine i onečišćenja

uklonili. Ovi talozi su najčešće soli kalcija i magnezija (kamenac), korozija, mulj i obrastanje nastalo uslijed curenja ili mikrobiološkog porijekla (želatinoznog ili viskozno).

Tablica 1. Talozni prirodni i umjetni porijekla [9]

| Talozi prirodnog porijekla                       |                             |   |
|--|-----------------------------|---|
| Iz vode  | Iz zraka                    |   |
| Obrastanje                                       | Plin                        |   |
| Mulj   | Prašina                     |   |
| Prirodne organske tvari                          | Organske tvari (vegetacija) |   |
| Otopljeni minerali                               | Mikrobiološki organizmi     |   |
| Makro i mikrobiološki organizmi                  | Insekti i sl.               |   |
| Talozi umjetnog porijekla                        |                             |   |
| Iz vode  | Iz zraka                    | Iz sustava                              |
| Čestice prenesene nakon prolaza kroz pročišćivač | Plin                        | Produkti korozije                       |
| Zagađivači                                       | Sumoporovodik               | Inhibitori korozije i njihovi reaktanti |
| Fosfati  | Sumpor dioksid              | Procesno zagađenje                      |
| Deterdženti                                      | Ugljikov dioksid            |   |
| Kanalizacijski otpad                             | Amonijak                    |   |

Neki uzroci taloženja:

- prenesene čestice iz drugih dijelova pogona
- loša pH kontrola
- niska brzina strujanja
- atmosfersko zagađenje
- variranje kvalitete dodatne rashladne vode
- prevelika/ premala koncentracija inhibitora korozije.

#### **4.1.2. Uštede u održavanju**

Uštede ostvarene na troškovima:

- vrijeme proizvodnje
- neproduktivni rad i oprema
- materijali za čišćenje i fizički rad
- smanjenje radnog vijeka opreme
- prerana zamjena opreme.

Većinom su ubrojani u troškove pogona i nije uobičajeno računati ih odvojeno, ali nekad su većih iznosa od predviđenog pa se ovako izdvajaju i specifični su za svako postrojenje.

#### **4.1.3. Uštede novim sistemima**

Bilo kakav sustav koji pokaže poboljšane performanse od postojećeg, može se ugraditi i time ostvariti uštede na razini cijelog postrojenja. Razmatraju se mnoga područja u kojima su moguća poboljšanja djelovanja kao što su: čišće izmjenjivačke površine na izmjenjivačima topline koje se dobiju primjenom kemikalija i/ili mehaničke opreme, odgovarajući izbor materijala za distributivne cijevi kako bi se smanjila opasnost od korozije,...

Kao svojevrsni zaključak - moguće su značajne uštede energije u rashladnim sustavima. Svaki sustav treba promatrati po dijelovima, ali i kao cjelinu, jer su moguće uštede u inače predviđenim ili manje bitnim dijelovima sustava. Uštede su onda moguće u preinakama različitih komponenti rukovanja vodom, izborom kemikalija ili dizajnom sistema.

### **4.2. Tretman rashladne vode**

#### **4.2.1. Problemi protočnih sustava**

Kod protočnih sustava nema recirkulacije vode, stoga su tehnološki zahtjevi za rashladnu vodu puno manje rigorozni, ali opet prisutni. Problemi onečišćenja vode kod protočnih sustava mogu se kategorizirati u 3 skupine:

- korozija
- kamenac i ostalo taloženje
- biološke nakupine

Korozija se može definirati kao trošenje ili gubitak dijelova baznog metalnog materijala u sustavu. Razni oblici korozije su prisutni u protočnim sustavima, ali kod svih oblika odvojeni komadi baznog metala stvaraju zapreke i smetnje u protočnom toku vode. Uz mehaničke zapreke koje korozija uzrokuje, prisutni su ozbiljni procesi zagađenja i/ili otpusni problemi koji su rezultat aktivne korozije. Korozija cjevovoda od željeznih materijala rezultira u pojavi željezovog oksida koji je višestruko većeg volumena od gubitaka metala iz stijenke cijevi. Nakupljanje produkata korozije na stijenkama cijevi smanjuje protočnost, uzrokuje veće tlakove na pumpi i posljedično veće troškove crpljenja te zahtijeva skupa mehanička i kemijska čišćenja.

Naslage kamenca i ostali talozi stvaraju izolacijski sloj na stijenkama cijevi otežavajući prijenos topline. Pri ekstremnim količinama taloga moguća su hidraulička ograničenja toka koja dodatno smanjuju mogućnost odvođenja topline od hlađenog tijela. Moguća su oštećenja u kombinaciji s korozijom gdje se korozija odvija ispod taloga. Talozni su obično podijeljeni od dva tipa:

- kristalinične anorganske naslage (kada su granice topljivosti prekoračene)
- mulj (taloženje krutih tvari)

Problemi biološke prirode mogu se kategorizirati u mikrobiološke i makrobiološke. Množenje bioloških organizama u rashladnom sustavu najčešće rezultira sličnim problemima kao i pojava korozije. Značajni razvoj mikrobiološkog zagađenja uzrokuje oštećenje opreme, smanjen prijenos topline, mikrobiološki uzrokovanu koroziju i moguća ograničenja protoka vode [7].

#### ***4.2.2. Problemi otvorenih recirkulacijskih sustava***

Količina otpadne vode je puno manja od protočnih sustava te su, u kontrastu pozitivnog aspekta uštede vode, otvoreni recirkulacijski sustavi podložniji nastajanju zagađenja i problema u rashladnom sustavu uslijed opetovanog korištenja iste vode. Neki od njih su:

- zbog isparavanja rastu koncentracije otopljenih tvari u vodi povećavajući sklonost taloženju i koroziji
- povećana opasnost od korozije uslijed relativno viših temperatura vode
- dulje vrijeme zadržavanja i toplija voda su pogodna atmosfera za biološko zagađenje

- plinovi iz zraka (npr. sumporov dioksid, amonijak, sumporovodik) otapaju se u vodi i pospješuju koroziju
- moguće je unos mikroorganizma, nutrijenata i drugih nečistoća iz zraka pri strujanju zraka kroz rashladni toranj i u njegovom kontaktu s rashladnom vodom.

#### 4.2.2.1. Proračun koncentracijskih ciklusa

Voda cirkulira kroz procesne izmjenjivače i rashladni toranj brzinom koja se naziva „stopa recirkulacije“ (recirculation rate). Još jednom, gubici vode definirani su kroz isparavanje, gubitak kapljicama i ispuštanje (za potrebe proračuna ispuštanje se definira kao svi gubici vode nastali van procesa isparavanja). Svi gubici rashladne vode u sustavu nadoknađuju se dodatnom rashladnom vodom.

Kako voda isparava ostaje određena koncentracija minerala u cirkulirajućoj vodi koja sad ima višu koncentraciju minerala u sebi od koncentracije u dodatnoj vodi. Kemijski sastav ispuštene vode je identičan onom cirkulirajuće vode.

Broj koncentracijskih ciklusa određen je omjerom koncentracije otopljenih minerala u vodi koja se ispušta i koncentracijom otopljenih minerala svježje dodatne vode. Budući da su kloridi i sulfati dobro topljivi i pri visokim koncentracijama, dobar su izbor za mjerenje ciklusa. Međutim, rezultati proračuna mogu biti nevažeci ako se klor ili sumporna kiselina dovode u sustav kao dio programa za pročišćavanje vode.

Ciklusi temeljeni na provodljivosti često se koriste kao jednostavan način za automatizaciju ispuštanja vode.

Prema iznesenim odnosima i promatranjima dobije se jednostavna formula:

$$\text{Koncentracijski ciklusi} = \frac{\text{Koncentracija u ispuštenoj vodi}}{\text{Koncentracija u nadoknadnoj vodi}}$$

Koncentracijski ciklusi se isto mogu inverzno izraziti kao:

$$\text{Koncentracijski ciklusi} = \frac{\text{Nadoknadna voda}}{\text{Ispuštanje}} = \frac{\text{Isparavanje} + \text{Ispuštanje}}{\text{Ispuštanje}}$$

Jednostavnim prebacivanjem jednadžbe dobijemo izraz za automatizaciju ispuštanja vode:

$$\text{Ispuštanje} = \frac{\text{Isparavanje}}{(\text{Koncentracijski ciklus} - 1)}$$

Gornji izraz je vrlo koristan u proračunima rashladnog procesa jer se koncentracija kemikalija za tretman vode ne gube kroz isparavanje nego kroz ispuštanje vode. Stoga ovaj izraz izravno govori o potrebnom intenzitetu i troškovima nadoknade kemijskih tretmana vode [7].

#### 4.2.2.2. Ograničenja broja koncentracijskih ciklusa

##### Fizikalna ograničenja

Postoji konačna vrijednost broja ciklusa koje voda u rashladnom tornju može proći. Mehanički gubici vode (gubitak kapljicama) u novijim tornjevima iznose oko 0,02% recirkulacijske stope. Noviji sustavi koriste učinkovite eliminatore kapljica koji optimiziraju proces i podižu broj ciklusa na 50-100 [7].

##### Kemijska ograničenja

Porastom koncentracije otopljenih krutina u vodi, rastu i tendencije taloženja i korozije. Postaje sve teže i skuplje spriječiti korodiranje kako se specifična električna vodljivost, uslijed porasta koncentracije otopljenih krutina, približava i prelazi 10 000  $\mu\text{S}$  (mikro Siemens) [7]. Neke soli su manje topljive pri višim temperaturama te tako tvore talog na vrućim izmjenjivačkim cijevima. Isto tako, puno soli je manje topljivo pri višoj vrijednosti pH: pri većem broju koncentracijskih krugova i porastom pH sustava dolazi do intenzivnijeg formiranja kamenca.

Budući da je jedna od najmanje topljivih soli, kalcijev karbonat je uobičajeni stvaratelj kamenca u otvorenim recirkulacijskim rashladnim sustavima. Mogu se pojaviti i kalcijev i magnezijev silikat, kalcijev sulfat i druge vrste kamenca.

Gubici vode uslijed odmuljivanja ovise o faktoru uparenja (faktor ugušćenja). Definiran u poglavlju 3.2.1.2. *Bilanca topline*, faktor uparenja se računa kao omjer koncentracija tvari u recirkulacijskoj i dodatnoj vodi te optimalno ima vrijednost od 4 do 6 [8].

Sa ili bez kemijskog tretmana vode, broj koncentracijskih ciklusa neizbježno je ograničen zbog nemogućnosti sprječavanja stvaranja kamenca.

#### **4.2.3. Problemi zatvorenih recirkulacijskih sustava**

Zbog gotovo nepostojećeg kontakta cirkulacijske vode sa vanjskim okolišem i zrakom, zatvoreni sustavi imaju naizgled puno više prednosti od nedostataka. Smanjenja je mogućnost biološkog, kemijskog i fizikalnog zagađenja vode. Reducirana je pojava korozije u sustavu jer voda nije konstantno obogaćivana kisikom iz zraka kao što je to slučaj u otvorenom sustavu. Jedina mjesta ulaza kisika u sustav su na površini napojnog spremnika, kod cirkulacijskih pumpi i vode za nadopunu (vrlo male količine). Potrebni su jednostavni tretmani za skoro potpunu eliminaciju korozije i nakupljanja korozivnih produkata.

#### **4.3. Svrha tretmana rashladne vode**

Uz hlađenje TEP-a, cirkulacijska voda uzorkuje različite probleme:

- korozija izmjenjivača topline, unutrašnjih premaza, pumpi, ventila, itd.
- taloženje kamenca
- oštećenje konstrukcijskih materijala rashladnog tornja
- stvaranje okruženja pogodnog za rast mikroorganizama
- pospješuje rast i razmnožavanje patogenih bakterija tipa *Legionella*

Kako bi se uklonili ili minimalizirali ovi problemi, voda prolazi kroz razne tretmane.

1. Da bi se izbjeglo taloženje kamenca na izmjenjivačkim površinama:
  - Uklanjanjem elemenata koji uzrokuju taloženje vanjskim tretmanom
    - Uklanjanje karbonata postupkom umekšavanja vapnom
    - Umekšavanje pomoću smole za ionsku razmjenu
  - Dodavanjem tvari za regulaciju uvjeta formacije kristala
    - Snižavanje pH vrijednosti dodavanjem kiseline
    - Sredstvima protiv rasta kristala tijekom vremenskog perioda dovoljnog za izbjegavanje formiranja mineralnih naslaga
2. Da bi se izbjeglo oštećenje metala u kontaktu s rashladnom vodom:
  - Korozijskim inhibitorima, prikladnim metalima na postrojenju
  - Disperzantima, koji sprječavaju taloženje i stvaranje mulja.
3. Da bi se izbjeglo obrastanje rashladnih površina:
  - Biološkom kontrolom
  - Djelomičnom filtracijom sporedne struje vode



- Disperzivnim sredstvima.
4. Da bi se izbjegla proliferacija (intenzivan rast i razvoj te širenje u okoliš) bakterija roda *Legionnella*:
- Korištenje odmagljivača i eliminatora kapljica što učinkovitije
  - Prilagođeni bakteriocidni tretmani
5. Da bi se izbjeglo zagađenje uslijed ispuštanja vode:
- Korištenje netoksičnih kemikalija za tretman
  - Naknadna obrada ispuštene vode [9]

#### **4.4. Osnovni principi tretmana**

##### **4.4.1. Kamenac**

Kamenac je tvorevina od mineralnih kristalnih naslaga nastala stvaranjem kristala u prezasićenoj otopini. Obično su dobro kohezivni i čvrsto prijanjaju uz podlogu. Kad god je količina prisutne soli u vodi veća od granice topljivosti i zasićenja, taloži se u obliku kamenca. Obično se taloži na vrućim površinama zbog manje topljivosti soli u toploj otopini od hladne otopine. Soli koje najčešće čine sastav kamenca su: silicij, kalcijev sulfat, kalcijev fosfat i kalcijev karbonat.

Što se tiče prve dvije vrste soli, postoje izvedena empirijska pravila izračuna broja koncentracijskih ciklusa koja glase [9]:

1. Silicij će se taložiti ako je njegova koncentracija u recirkulacijskoj vodi veća od  $50 \cdot (pH - 3,5)$
2. Kalcijev sulfat će se taložiti ako je vrijednost  $0,4 \cdot (THCa \cdot SO_4)$  veća od 500.000 za vodu sa visokom pH vrijednosti.

U gornjem 1.1 dijelu teksta objašnjeno je kako u suštini postoje dva načina sprječavanja tvorbe kamenca. Ovdje će se malo detaljnije navesti ti tretmani.

##### **4.4.1.1. Uklanjanje elemenata koji tvore kamenac**

Ovaj tretman uključuje već spomenute procese umekšavanja vapnom i korištenje smola za ionsku izmjenu. Pod primjenom ovih tretmana podrazumijevaju se i ubrajaju troškovi procesa i radne snage te je odlučujući faktor u primjeni ovih tretmana dostupnost nadoknadne vode.

#### 4.4.1.2. Dodavanje tvari

- Solubilizacija (kemijsko čišćenje) dodavanjem kiseline

Dodavanjem kiseline kalcijev bikarbonat se pretvara u kalcijev sulfat koji se lakše topi u vodi i tako omogućava veći broj koncentracijskih ciklusa.

- Dodavanje inhibitorskih disperzivnih agenata: podijeljeni su u dvije skupine: fosforne molekule i organske polimerne molekule.

##### Fosforne molekule:

- anorganski polifosfati (npr. natrijev heksametafosfat)
- fosforne kiseline i njihove soli: organski produkti dobiveni sintezom

Organske molekule: svi organski polimeri korišteni za sprječavanje formiranja kamenca pripadaju obitelji polikarboksilnih kiselina i njihovim solima. Najčešće su to derivati poliakrilnih, polimetakrilnih i polimaleinskih kiselina. Većina ovih polimera, danas dostupnih na tržištu, mogu izdržati temperature do 300 °C [9].

Fosfati i njihove mješavine su obično bolja sredstva za sprječavanje kamenca od samih polimera.

#### 4.4.2. Korozija

Korozija nastaje u jedinici gdje su prisutna dva različita metala u kontaktu ili dvije različite regije istog metala (anodna i katodna regija) okruženog vodom. Električna struja izlazi iz anodne regije metala, prolazi kroz okolnu vodu te dolazi do katodne regije gdje se, kroz metal, vraća u anodni dio. Korozija nastaje na području gdje struja izlazi iz anode i jedini način sprječavanja nastajanja korozije jest prekidanje toka električne struje izolacijskim materijalom kako bi se stvorila električna barijera.

Sloj kamenca čvrsto istaložen na metalnu površinu može poslužiti kao izolacija. U nekim situacijama može spontano doći do formiranja kamenca koji pomaže u sprječavanju pojave korozije, u suprotnom ne dolazi do formiranja sloja kamenca i postoji opasnost od korozije. Naime ova metoda je jako nestabilna i nepredvidiva pa se ne koristi u današnjim tretmanima. Postoje razne kemikalije i premazi kojima se obrađuju metali: neki na anodnim, neki na katodnim dijelovima [9].

Pojednostavljeno, postoje 2 efektivna načina tretmana korozije:

- a) Postizanje korozivnih uvjeta u recirkulacijskoj vode kako bi se spriječila formacija kamenca (jer se on ne može taložiti iz vode koja ima korozivnu tendenciju) i naknadno dodavanje korozivnog inhibitora kako bi se spriječila pojava korozije.

Kako bi se postigli korozivni uvjeti u recirkulacijskoj vodi dodaje se dovoljno kiseline (obično sumporne kiseline) kako bi se postigla pH vrijednost vode od 6,5 (na nižoj pH vrijednosti korozivni inhibitori postaju neučinkoviti). Nakon prvog dijela postupka, u vodu se danas, najčešće, dodaju cink-fosfatne smjese ili samo karboksi fosfat.

- b) Namjerno postizanje uvjeta formiranja kamenca i radu sustava pri pH vrijednosti između 8,3 i 8,8 koja se naziva „slobodna pH vrijednost“ (free pH) [9]. Slobodni pH odgovara pH vrijednosti ravnoteže vode nakon nestanka balansirajućeg ugljičnog dioksida (s obzirom na fizikalno-kemijski sastav vode), a kako bi se izbjegao talog kamenca, neophodno je uvesti inhibitor kamenca koji usporava i sprječava nastajanje naslaga. Postoje dvije grupe inhibitora: fosfati i poliakrilati. Usporavaju taloženje kalcijevih soli i smanjuju njihovu sposobnost stvaranja kamenca.

#### **4.4.3. Začepjenja/ Naslage**

Začepjenje je pojava nakupljanja zagađujućih tvari u recirkulirajućoj vodi na nekoj mehaničkoj prepreci te su raznih izvora: čestice mulja donese iz nadoknadne vode, prašina donesena zrakom, ostatak od raznih tretmana vode ili prisustva mikroorganizama (bakterije, alge i gljivice) u recirkulacijskom krugu.

##### **1) PRIRODNO PORIJEKLO:**

- VODA:
  - Mulj
  - Organske tvari
  - Otopljene tvari
  - Mikro i makroorganizmi.
- ZRAK:
  - Plin
  - Fina prašina
  - Organske tvari (vegetacija)

- Mikroorganizmi
- Insekti, itd.

## 2) UMJETNO PORIJEKLO:

- VODA:
  - Tvari prenesene iz pročišćivača
  - Otopljene ili suspendirane tvari
  - Fosfati
  - Deterdženti.
- ZRAK:
  - Vodikov sulfid
  - Sumporov dioksid
  - Amonijak.
- SUSTAV:
  - Produkti korozije
  - Korozivni inhibitori i njihove reakcije
  - Sustavna nekontrolirana ispuštanja.

### 4.4.3.1. Sprječavanje začepjenja uslijed naslaga

#### Mehanički tretman

Iako nekad zahtijevaju više investicije u sam proces od kemijskih, nekad su nezamjenjivi i često vrlo korisni i učinkoviti u uklanjanju nastalog problema. U recirkulacijskim sustavima hlađenja vrlo je učinkovit proces filtracije sporednog toka recirkulacijske vode. Omogućava uklanjanje naslaga i nečistoća koje donose nadoknadna voda, zrak i zagađivački dijelovi procesa. Postoje mnoge vrste učinkovitih filtera koji dobro uklanjaju krute tvari i ulja iz protoka što smanjuje začepjenja većim česticama na minimum. Filteri i rešetke se koriste na usisnim mjestima rashladnih tornjeva i smanjuju koncentraciju zagađivačkih čestica, ptičjim perjem, insektima koji se donose ustrujavanjem vanjskog zraka.

## Kemijski tretman

Začepljenje i taloženje naslaga može se kontrolirati na sljedeće načine:

- I. Uklanjanje naslaga nakon formiranja uz program redovite regulacije i održavanja
- II. Povremeno tretiranje kiselinom kako bi se uklonile nečistoće
- III. Primjenom preventivnog programa

Vrlo je bitno poznavati porijeklo i tip prisutnog zagađenja kako bi se odabrao odgovarajući tretman. U suprotnom, primjenom pogrešnog tretmana čak se može inducirati taloženje naslaga. Ulogu u sprječavanju naslaga zagađenja pri velikom asortimanu proizvoda odrađuju:

- Polimeri
  - Prirodni organski polimeri su se prvi koristili: tanini, alginati i škrobne tvari
  - Akrilni polimeri niske molekularne težine koji se danas koriste te su potrebne doze puno manje .
- Polifosfati
- Polinaftilmetanosulfati (PNMS)
  - Ovo su anionski disperzanti koji nemaju efekt pjenjenja i učinkoviti su pri svim susretljivim pH vrijednostima rashladne vode. Ostaju kao talog u vodi pa se izbacuju iz sustava putem ispuštanja vode. Imaju izvanredan učinak fluidizacije minerala, suspenzirane gline i mulja, omogućujući tako lakše uklanjanje u predtretmanima rashladne vode.
- Površinski aktivne tvari
  - Smanjuju površinsku napetost vode rezultirajući potenciranjem učinka dodanih biocida za tretman vode(mogu tvoriti pjenu u zonama turbulencije). Ponašaju se kao emulzijski agent za uljane tvari i nečistoće nastale uslijed zagađenja vode ili curenja opreme. Isto tako, učinkovito raspršuju mulj mikrobiološkog porijekla.

Ispod vidimo tablični prikaz tipičnih zagađenja i naslaga koje su se nakupile u 3 različita uzorka rashladne vode koji su zaostali nakon sušenja vode na 110 °C (isparni ostatak) tijekom 24 sata.

- „A“ uzorak je uzet iz velikog kemijskog postrojenja. Za hlađenje se koristi rashladni toranj i voda je tretirana cink/organskim mješavinama za kontrolu korozije.
- „B“ uzorak je uzet iz rafinerije koja koristi protočno hlađenje.
- „C“ uzorak je uzet iz rafinerije koja za rashladne svrhe koristi obližnju rijeku.

Tablica 2. Postotci vrsta taloga u isparnom ostatku rashladne vode [9]

| NEČISTOĆE                          | A    | B    | C    |
|------------------------------------|------|------|------|
| <b>Pepeo</b>                       | 30%  | 17%  | 55%  |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 2%   | 35%  | 12%  |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 1%   | 13%  | 8%   |
| <b>CaO</b>                         | 10%  | 4%   | 1%   |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 30%  | 25%  | 23%  |
| <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>  | -    | 4%   | 1%   |
| <b>ZnO</b>                         | 25%  | -    | -    |
| <b>CO<sub>2</sub></b>              | 2%   | -    | -    |
| <b>SO<sub>3</sub></b>              | -    | 2%   | -    |
| <b>Ukupno</b>                      | 100% | 100% | 100% |

#### 4.5. Mikrobiološko zagađenje i tretmani

Mikroorganizmi su prisutni svugdje: bilo to u zraku, vodi ili u tlu te imaju ključnu ulogu u trajnom recikliranju tvari u prirodi. Imaju puno pozitivnih primjena u prehrambenim i kemijskim industrijama, ali u energetskim industrijama često imaju negativan učinak na tehničke procese. Ulaženjem u vodne sustave postrojenja mogu uzrokovati neke od slijedećih problema:

- Onesposobljavanje opreme i snižavanje učinkovitosti postrojenja
- Disperziju patogene bakterije *Legionella pneumophila* aerosolima u rashladnim tornjevima
- Koroziju kontaktnih elemenata (izmjenjivača, cjevovoda,...) što im znatno smanjuje radni vijek

#### 4.5.1. Mikroorganizmi u rashladnim tornjevima

Iako svi rashladni sustavi imaju određenu mogućnost formiranja i proliferacije mikroorganizama, rashladni tornjevi su najpodložniji te će se na tom primjeru dalje prikazati vrste mikrobioloških zagađenja. Mikroorganizmi prisutni u sustavu rashladnog tornja se dijele u 3 velike grupe:

- Bakterije
- Alge
- Gljivice

##### 4.5.1.1. Bakterije

Mnoge vrste bakterija luče polisaharide koji djeluju kao vezivo u naslagama formiranim na površinama za izmjenjivanje topline. Ovaj sekret se još naziva i „biofilm“ te služi kao skupljač za suspendirane krute tvari prisutne u vodi, kao i svojevrsno prebivalište raznih vrsta bakterija. U sljedećoj tablici su prikazane moguće vrste bakterija te njihove posljedice na postrojenje kao i uvjete u kojima se razmnožavaju.

Tablica 3. Vrste bakterija [9]

| TIP  | VRSTA  | PROBLEMI KOJE UZROKOUJU   | POTREBNI pH          | POTREBNA TEMPERATURA (°C) |
|--|--|---|----------------------|---------------------------|
| Tvorci mulja:<br>Nemaju spore,<br>Aerobne,<br>Zaćahurene | <i>Pseudomonas</i><br><i>Flavobacteriu</i><br><i>Aerobacter</i><br><i>Entobacter</i><br><i>Mucoides</i><br><i>Klebsiella</i><br><i>Proteus</i> | Zagađivanje,<br>Štite korozivne bakterije,<br>Zaštita od inhibitora | 4-8<br>Optimalno:7,4 | 20-40                     |
| Aerobne,<br>Tvorci spora                                 | <i>Bacillus subtilis</i><br><i>Bacillus</i>  | Zagađivanje,<br>Štite korozivne bakterije,<br>Teže za ukloniti      | 5-8                  | 20-40                     |

|  |  |  |         |                 |
|--|--|--|---------|-----------------|
| Korozivne:<br>Talože željezo               | <i>Gallionella</i><br><i>Crenothrix</i><br><i>Leptothrix</i><br><i>Sphaerotilus</i><br><i>Streptomyces</i> | Zagađivanje,<br>Taloženje<br>željeznog<br>oksida,<br>Pojačavaju<br>koroziiju | 7,4-9,5 | 20-40,<br>10-60 |
| Tvorci<br>sumporne<br>kiseline,<br>Aerobne | <i>Thiobacillus</i><br><i>thiooxydans</i>  | Koroziija metala   | 1-6     | 20-40           |
| Tvorci<br>dušične<br>kiseline              | <i>Nitrobacter</i> ,<br><i>Nitrosomonas</i>  | Koroziija metala   | -       | 20-40           |
| Tvorci<br>sulfida,<br>Aerobne              | <i>Desulfovibrio</i><br><i>Clostridium</i><br><i>Thiobacillus</i>  | Koroziija metala,<br>Ispuštaju<br>plinove,<br>Neugodni mirisi                | 4-8     | 20-40           |

#### 4.5.1.2. Alge

Alge su kategorizirane kao niži oblici biljaka zbog odsutnosti tkiva koja proizvode sok u biljkama, ali za razliku od gljiva sadrže klorofil. Najčešće se nalaze u otvorenim bazenima, posebice na površini vode i na strukturama rashladnih tornjeva. Proizvode kisik te tako pospješuju koroziiju uz problem zagađivanja vode. U tablici su prikazane najčešći vrste algi.



Tablica 4. Vrste algi [9]

| TIP               | VRSTA  | PROBLEMI KOJE UZROKOUJU   | POTREBNI pH | POTREBNA TEMPERATURA(°C) |
|-------------------|--|---|-------------|--------------------------|
| Zelene alge       | <i>Chlorococcus</i><br><i>Ulathrix</i><br><i>Spirogra</i><br><i>Synedra</i><br><i>Scenedesmus</i>          | Masivna količina vegetacije ometa pravilnu distribuciju vode,<br>Zagađenje,<br>Nakupljaju suspendirane tvari u vodi,<br>Štite korozivne bakterije | 5,5-8,9     | 30-35                    |
| Plavo-zelene alge | <i>Chlorococcus</i><br><i>Oscillatoria</i><br><i>Anacystis</i><br><i>Stichococcus</i><br><i>Phormidium</i> | -   | 6-6,8       | 35-40                    |
| dijatomeje        | <i>Cyclotella</i><br><i>Navicula</i><br><i>Flagilaria</i><br><i>Diatoma</i><br><i>Asterionella</i>         | -   | 5,5-8,9     | 18-35                    |

#### 4.5.1.3. Gljivice

Gljivice su oblici biljaka koje nemaju klorofil, ali imaju jaku celuloznu membranu. Mogu se naći kao izolirane stanice, u kolonijama ili nitima raznih stupnjeva grananja. Zbog manjka klorofila, ovise o ostalim organizmima za opskrbu ugljikom. Vrlo su otporne na biocide koji mogu samo onemogućiti razmnožavanje sporama, ali ne i uništiti gljivu. U donjoj tablici prikazana je podjela najčešćih vrsta gljiva.

Tablica 5. Vrste gljivica [9]

| TIP                 | VRSTA  | PROBLEMI KOJE<br>UZROKOUJU  | POTREBNI<br>pH           | POTREBNA<br>TEMPERATURA(°C) |
|---------------------|--|---|--------------------------|-----------------------------|
| Gljive<br>(nitaste) | <i>Aspergillus</i><br><i>Alternaria</i><br><i>Penicillium</i><br><i>Fusarium</i><br><i>Mucor</i><br><i>Streptomyces</i><br><i>Cladosporium</i> | Površno truljenje drveta,<br>Zagađivanje,<br>Stvaranje korozivnih stanica,<br>Stvaranje mulja | 2-8,<br>Optimalno<br>5-6 | 0-40                        |
| Kvasci              | <i>Trichoderma</i><br><i>Torula</i><br><i>Monilla</i><br><i>Verticillum</i><br><i>Saccharomyce</i><br><i>Endomyces</i><br><i>Oospora</i>       | Stvaranje mulja,<br>Zagađivanje,<br>Stvaranja korozivnih stanica                              | 2-8,<br>Optimalno<br>5-6 | 0-40                        |
| Utrobnjače          | <i>Poria</i><br><i>Lenzites</i>  | Ozbiljnije unutarnje truljenje<br>drveta  | 2-8,<br>Optimalno<br>5-6 | 0-40                        |

## **5. LEGIONELLA PNEUMOPHILA**

Legionarska bolest je prvi put opisana kao atipična upala pluća, pojavila se 1976. nakon epidemije koja je zarazila više od 200 pojedinaca u Philadelphiji na skupu legionara i rezultirala smrću 34 osobe [9]. Dugotrajnom analizom utvrđeno je da je uzročnik te upale pluća do tada nepoznata bakterija nazvana *Legionella pneumophilla*, a bolest je nazvana legionarskom bolesti.

*Legionella* je bakterija hidrotelurskog porijekla, do danas je otkriveno 43 podvrste i 64 različite grupacije. Gram negativna bakterija podvrste *Legionella pneumophilla* uzrokuje 90% bolesnih stanja ljudi okarakterizirane kao leginarska bolest [9].

Može preživjeti na temperaturama ispod 25 °C, a u temperaturnom intervalu od 25 do 45 °C se intenzivno razmnožava. Obitava u biofilmu koji stvara velike probleme u održavanju kvalitete rashladne vode. Pri temperaturi od 50 °C ugiba u vremenu od par sati, dok pri 60 °C period ugibanja i uništenja bakterije traje svega par minuta. Podnosi velik raspon pH vrijednosti (6 do 10). Proliferacija (intenzivni rast i razvoj) se događa u okolišu s visokim koncentracijama kalcija, magnezija, metalnih taloga i određenih materijala kao što su guma, polivinil klorid(PVC) ili silicij. Isto tako razmnožava se u prisustvu cijanobakterija ili ameba te obitava u biofilmu [9].

### **5.1. Oblici bolesti**

Zaraza ovom bakterijom uglavnom se događa kroz udisanje sitnih kapljica vode, aerosolom, koji se s rashladnih tornjeva prenosi u bliži i dalji okoliš. Nakon ulaska u dišni sustav čovjeka, aerosol dolazi do plućnih alveola, bakterije iz kapljica napadaju pluća, zaraze plućne makrofage i izazivaju njihovo propadanje. Postoje dva oblika bolesti uzrokovane bakterijom *Legionella*:

- Pontijačka groznica

Pontijačka groznica je blaži od dva oblika bolesti, najčešće traje 2 do 5 dana i stopa smrtnosti je neznatna. Simptomi su slični slabom obliku gripe sa gubitkom snage, boli u mišićima, glavoboljom, osjećajem mučnine i sl. Ima visoku stopu zaraznosti, pogađajući 95% izloženih jedinki.

- Legionarska bolest

Legionarska bolest je teži od dva oblika bolesti, to je zapravo atipična upala pluća i ako se ne tretira, moguće je veliko pogoršanje zdravstvene slike s mogućnošću smrtnih posljedica. Najčešće ju uzrokuje *L .pneumophila* (moguće prisustvo i drugih organizama), traje tjednima te stopa

smrtnosti kod bolničkih pacijenata doseže do 80% [10]. Nije prenosiva s čovjeka na čovjeka i često se u početnim fazama okarakterizira kao anoreksija, malaksalost i letargija, ali nema definirane karakteristične simptome prema kojima bi se moglo brzo reagirati i početi odgovarajuća terapija. Ostali simptomi, koji nisu uniformni i ne pogađaju svakoga, uključuju[10]:

- Suhi kašalj
- Bol u prsima
- Crijevni problemi
- Bol u abdomenu
- Vrućica
- Delirij
- Zbunjenost
- Depresija
- Drhtanje ekstremiteta
- Cerebralna disfunkcija.

Općenito se svim pacijentima daje probni antimikrobni tretman, prema procjeni težine upale pluća i čimbenika rizika vezana za domaćina.

## **5.2. Zagađenje rashladnih tornjeva bakterijom *Legionella***

Sustavi hlađenja s rashladnim tornjevima (atmosferskim) predstavljaju idealne uvjete za razvoj bakterije *Legionella* zbog temperature vode i kontakta sa zrakom. Jedna od opasnosti je razvijanje bakterije u cirkulacijskoj vodi te daljnji prijenos vjetrom kroz otpuhane kapljice vode van tornja u bliži, ali i dalji okoliš tornja. Naslage kamenca, produkti korozije i biofilmovi koji su često prisutni na površinama pogoduju razvoju *Legionella* bakterije. Formacija aerosola koji uzrokuju zagađivanje *Legionella* bakterijom ima dva porijekla:

- Gubici vode odneseni vjetrom
- Prijenos vode u vjetrovitim zonama.

Razliku između ova dva porijekla objašnjavaju parametri kvalitete i stupnja čistoće separatora kapljica te porast recirkulacijskog toka u usporedbi sa nominalnim tokom. Tablice i provedena mjerenja u izvoru [9] pokazuju da će dobro opremljen toranj, i s puno većom koncentracijom *Legionelle* u sustavu, izbacivati manje *Legionella* bakterije u aerosolu nego manje zaražen, a

tehnički lošije opremljen toranj. Isto tako rezultati pokazuju da razina zagađenosti bakterijama *Legionella* nije dovoljan parametar za procjenu zdravstvenog rizika [9].

### **5.3. Tretmani uklanjanja zagađenja *Legionellom* u rashladnim tornjevima**

Primjenjuju se tretmani sa bakteriocidnim djelovanjem. Primarno djelovanje je sprječavanje pojave kamenca i korozije te su najučinkovitiji i najčešće korišteni sljedeći tretmani:

- Biocidni tretmani
- UV zračenje

#### **5.3.1. Biocidni tretmani**

Postoje tri glavna tipa biocidnih tretmana:

- A. Oksidirajući tretmani
- B. Neoksidirajući tretmani
- C. Disperzivni tretmani

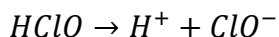
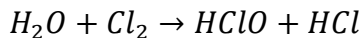
##### *5.3.1.1. Oksidirajući tretmani*

- Kloriranje
- Tretman klorovim dioksidom
- Tretman natrijevim hipokloritom
- Bromiranje
- Tretman ozonom

##### Kloriranje

Danas je čest tretman za dezinfekciju sustava, prvenstveno zbog niske cijene kemikalija i troškova održavanja. Može se u sustav dovesti u obliku plinovitog klora ili u obliku otopina koje sadrže klor: odjednom u velikim količinama ili kontinuirano. U rashladnoj vodi prisutne su brojne organske tvari koje reagiraju s klorom pa se tako smanjuje njegova raspoloživost za mikrobiološko djelovanje [9].

Klor u plinovitom stanju u potpunosti je topljiv u vodi te se odvija sljedeća kemijska reakcija:

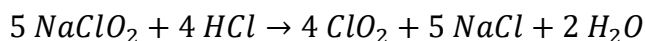
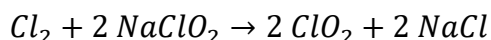


Nastala hipokloritna kiselina HClO jako je dezinfekcijsko sredstvo i većinski se formira na pH vrijednostima manjim od 7. Na pH vrijednostima višim od 7 hipokloritna kiselina počinje disociirati na vodikov ion  $H^+$  i hipokloritni anion  $ClO^-$ . Hipokloritni anion slabiji je dezinficijens od hipokloritne kiseline pa iz toga proizilazi činjenica da je kloriranje učinkovitije kada su pH vrijednosti do 7.

Prednosti ovog postupka su mali trošak i jednostavna primjena i nadzor, dok je negativna strana ta da zahtijeva mnoge zaštitne mjere i stvara štetne dezinfekcijske nusprodukte (trihalometani, halooctene kiseline,...).

### Tretman klorovim dioksidom

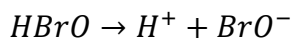
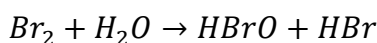
Uključuje miješanje otopine natrijevog klorita s klorom gdje se odvija slijedeća reakcija:



Klorov dioksid ima dvije prednosti u odnosu na čisti klor: ne reagira s amonijakom i njegova biocidna aktivnost nije narušena u pH intervalu od 6-10. Isto tako, ima bolja svojstva u borbi protiv algi: uništava klorofil u algama uzrokujući istjecanje vode iz protoplazme koje naposljetku uzrokuje uganjanje algi. Negativne strane tretmana klorovim dioksidom: spoj je nestabilan te se mora proizvoditi u blizini lokacije korištenja te činjenica da je skuplji od klora [9].

### Bromiranje

Pokazuje određenu prednost u odnosu na tretmane klorom. Moguće je dodavanje predtretmana bromom, ali u svim izvedbama aktivna molekula je hipobromna kiselina formirana slijedećom reakcijom:



Pri onečišćenjima dušikom, reakcija hipobromne kiseline s dušikovim ili amonijačnim derivatima identična je onoj s klorom, s jednom razlikom: ova reakcija je reverzibilna. Također, djelovanje broma je brže od klora te se dulje zadržava u otopini. Učinkovitije je pri višim pH vrijednostima

te je hipobromna kiselina manje korozivna i manje štetna za okoliš od klorne varijante [9]. Ove prednosti opravdavaju višu cijenu ovog tretmana (do 2 puta skuplji od kloriranja).

#### Tretman ozonom

Temperatura vode uvelike utječe na brzinu otapanja plinova, među njima i ozona, te su otopljene količine funkcija temperature i tlaka. Nadalje, što je veća dodirna površina plina i vode to je otapanje uspješnije. Ozon je vrlo destruktivan za vegetaciju te ostatci ozona u radnom području ne smiju prelaziti 0,1 mg/l [9]. Kao biocid bolji je od klora iz sljedećih razloga:

- Ne reagira sa amonijakom
- pH ne utječe na ozon (iako je optimalno pH od 6,0 do 7,0)
- Puno kraće vrijeme procesa
- Ima prag koncentracije od 0,4-0,5 ppm iznad kojeg uništava žive organizme

Nedostatci:

- Ograničena upotreba kod voda koje sadrže bromide zbog nastajanja štetnih nusprodukata bromata
- Nema rezidualnog djelovanja
- visoka cijena tretmana [11].

#### *5.3.1.2. Neoksidirajući tretmani*

U mnogim slučajevima djelovanje neoksidirajućih biocida čini se učinkovitijim od oksidirajućih. Često se koriste istovremeno ili naizmjenice sa oksidirajućim biocidima kako bi se postigao širi spektar djelovanja. Današnji organski biocidi u upotrebi su:

- Aldehidi
- 2,2-dibrom-3-nitropropionamid (DBNPA)
- Izotiazolon
- Kvarterne amonijeve soli.

Neoksidirajući biocidi su u pravilu manje korozivni od oksidirajućih i često se koriste zajedno sa biodispergentima. Utječu na metabolizam mikroorganizama te su učinkoviti na velikom intervalu pH vrijednosti.

### 5.3.1.3. Disperzivni tretmani

Biodispergenti su molekule organskog porijekla i modificiraju površinsku napetost vode: dislokacija biofilma u kojem se nalaze bakterije i omogućivanje prodiranja biocida u biofilm. Mogu se koristiti opetovano u rashladnim sistemima, nisu toksični te se mogu koristiti pri čišćenju sustava. Mogu biti anionski, kationski ili čak bez naboja.

### 5.3.2. UV zračenje

Sunčevo zračenje ima odlična svojstva pročišćavanja vode zahvaljujući emisiji ultraljubičastog svjetla. Ovaj prirodni fenomen, u pojačanoj varijanti, putem UV sterilizatora dezinficira i gasi svu aktivnost živih stanica koje prolaze u vodi kroz komoru za UV tretman. Pod utjecajem UV valnih duljina (200 do 315 nanometara), DNA i RNA mikroorganizama se oštećuje te je tako blokirana mogućnost replikacije genetskog materijala i onemogućeno preživljavanje i razmnožavanje mikroorganizama [9].

Danas postoje novije tehnologije koje više uključuju UV zračenje kao sredstvo dezinfekcije vode. Jedna od tih izvedbi koristi UV zračenje u kombinaciji s vodikovim peroksidom,  $H_2O_2$ . Dekompozicijom  $H_2O_2$  na hidrosilne radikale -  $OH^\bullet$  postiže se brza neselektivna oksidacija gotovo svih tvari u vodi, uključujući i oštećenje tkiva mikroorganizama. U članku [12] je pokazano kako su kombinacijom ove dvije komponente uklonjeni gotovo svi nedostaci zasebnih dezinfekcijskih tehnika te su pokazane mnoge prednosti nove tehnike:

- Pouzdani rad rashladnog tornja na visokom stupnju učinkovitosti
- Nema nakupljanja taloga
- Poboľšano hlađenje
- Ukupni bakterijski broj i broj *Legionella* bakterija bi trebao ostati u granicama tolerancija
- Uštede na troškovima pogona
- Korozija na minimumu itd.

Glavni nedostaci: visoka cijena tretmana i ovisnost učinkovitosti procesa o mutnoći vode.



## 6. UTJECAJ NA OKOLIŠ

Zbog direktnog kontakta vode koja se ispušta nazad u okoliš, potrebno je pomno planiranje korištenja vode te njenog tretiranja kako bi povratna voda imala što manji utjecaj na okoliš i izvorno tijelo vode iz kojeg se crpi.

U slučaju protočnog hlađenja utjecaji na okoliš uključuju količinu crpljene vode, povišenje srednje temperature izvora vode i učinke na organizme u vodi, posebno ribe i rakove: odnosi se na ugibanje životinja uslijed naleta (hvatanje većih riba na mrežicama) i uvlačenja (uvlačenje manjih riba, jajašaca i ličinki kroz rashladne sustave). U sustavima koji koriste mokre rashladne tornjeve okolišni utjecaji se odnose na potrošnju vode te na vizualne učinke oblaka pare (perjanice) koji se emitira iz rashladnog tornja. Mnogi takve perjanice smatraju smetnjom koja kod nekih izvedbi tornjeva, pri dovoljno hladnim uvjetima, dopušta formiranje leda koji može prekriti tlo ili obližnje površine. Drugi mogući problem je i takozvani „prijenos“ („carryover“), gdje sol i drugi zagađivači mogu biti prisutni u kapljicama vode [4].

Provedena ispitivanja utjecaja TEP-ova na lokalne rijeke pokazuju da zagrijana rashladna voda vraćena u okoliš može znatno podići temperaturu rijeke i tako narušiti homeostazno stanje potrebno za neometano funkcioniranje ekosustava rijeke. Ispitivanje (Langford 1990.) je pokazalo da već pri pragu od oko 25 °C, povišena ambijentalna temperatura izvora postignuta vraćanjem vode nazad u izvor, postaje izrazito nepovoljna za vodeni ekosustav uslijed smanjenih razina kisika i povišene koncentracije amonijaka [3]. Otkriveni podaci su ponukali brojne države da propišu zakone o takozvanom „termalnom zagađenju“ u kojem su propisane granične temperaturne vrijednosti izvora vode. Dopuštenja za rad termoenergetskim objektima svakako moraju dati i povjerenstva koja proučavaju utjecaj na ekosustave vodnih okoliša koji preuzimaju toplinu (povjerenstva se sastoje od stručnjaka različitih profila i izdaju dopuštenja u obliku pravnog akta – vodopravne dozvole).

Primjer: Sredinom 2010. g. TVA je morala smanjiti snagu u svoje tri Browns Ferry jedinice u Alabami na 50% kako bi održala temperaturu riječne vode ispod propisana 32 °C, po gubitku od 50 milijuna dolara. Taj isti tjedan, temperature rijeka Rajne i Neckara u Baden-Wuerttemberg približile su se kritičnim 28 °C, prijeteći zatvaranjem nuklearnim i ugljenim elektranama. U kolovozu 2012. g. zatvorena je jedinica elektrane Millstone u Connecticutu jer je morska voda u Long Island Soundu premašila 24 °C, ali je u 2014. g. NRC odobrio korištenje morske vode do

26,7 °C. Nuklearna elektrana Turkey Point na Floridi koristi 270 km otvorenih kanala za hlađenje kondenzatorske vode te je iste, 2014. g. NRC dopustio povišenje dopuštene ulazne temperature na 40 °C [3].

Osim termalnog učinka na izvore vode, rashladna voda kemijski tretirana za rad u postrojenju mora proći određena mehanička i kemijska čišćenja kako bi se što više smanjilo unošenje neorganskih tvari u izvor vode. Sigurno je da su opcije netretirane vode u rashladnim sustavima, kao što su neke izvedbe protočnih rashladnih sustava, povoljnije od kemijski znatno tretiranih rashladnih voda kao u rashladnim tornjevima i zatvorenim recirkulacijskim sustavima. Koliko god da se voda tretira kako bi se postigao što neutralniji kemijski sastav, uvijek će se određena količina taloga i otopljenih tvari iz postrojenja dovoditi u okoliš.

Upravo zbog ove činjenice postoje zakonski propisi o sigurnom rukovanju i odlaganju otpadne vode u energetske sektoru. Oni će biti navedeni i objašnjeni u sljedećem poglavlju.

## 7. LEGISLATIVA

Prema Zakonu o vodama (NN 066/2019), članku br. 4 rashladne vode se definiraju kao “industrijske otpadne vode koje se koriste za odvođenje topline iz procesa ili uređaja, a mogu biti u zatvorenom ili otvorenom rashladnom krugu”[13].

Osim problema količine, pri korištenju vode iz prirodnih izvora TEP-ovi se moraju strogo pridržavati zakonskih propisa koji štite ekosustave rijeka, mora i jezera iz kojih se voda crpi.

Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda (NN 026/2020) [14], prilog br. 17 definira vrijednosti i kakvoću, među ostalim otpadnim vodama, otpadne rashladne vode u proizvodnji toplinske i električne energije. Odnosi se na :

- termoenergetska postrojenja i uređaje u kojima se koriste konvencionalna goriva (ugljen, biomasa, tekuća i plinska goriva) te kombinacija suspaljivanja otpada i regeneriranih goriva
- postrojenja protočnih i recirkulacijskih rashladnih sustava u elektranama i toplanama

U istom prilogu se navode i propisani postupci i zahtjevi obrade otpadne rashladne vode prije ispuštanja u okoliš. Neki od njih su:

- sve industrijske otpadne vode (od kemijske pripreme vode, mokrog odsumporavanja, kemijskog čišćenja i pranja, kotlovske vode i dr.) potrebno je pročistiti jednom od raspoloživih fizikalno-kemijskih metoda pročišćavanja (sedimentacija, neutralizacija, flokulacija, filtriranje, ionska izmjena i dr.)
- rashladne otpadne vode dovesti u stanje koje osigurava poštivanje graničnih vrijednosti emisija onečišćujućih tvari i/ili topline prijemnika
- kod obrade rashladne vode primijeniti alternativne, a ne kemijske načine obrade rashladnih voda
- sve opasne onečišćujuće tvari te opasni otpad, koje se skladište na lokaciji, potrebno je skladištiti na izoliranim nepropusnim površinama (po mogućnosti natkrivenim) sa zasebnim sustavom odvodnje i pročišćavanja onečišćenih oborinskih voda

Tablica 6. Granične vrijednosti onečišćujućih tvari za rashladne otpadne vode [14]

| Pokazatelji  | Izraženi kao                  | Jedinica           | Površinske vode                        | Sustav javne odvodnje               |
|--|-------------------------------|--------------------|--|-------------------------------------|
| FIZIKALNO-KEMIJSKI POKAZATELJI                     |                               |                    |  |                                     |
| 1. pH-vrijednosti                                  |                               |                    | 6,5-9,0                                | 6,5-9,5                             |
| 2. Temperatura na ispustu                          |                               | °C                 | 30<br>35 <sup>(a)</sup>                | 40                                  |
| 3. $\Delta T_R$ ne viša od                         |                               | °C                 | 10                                     | -                                   |
| 4. $\Delta T_P$ ne viša od                         |                               | °C                 | 3 <sup>(b)</sup><br>1,5 <sup>(c)</sup> | -                                   |
| EKOTOKSIKOLOŠKI POKAZATELJI                        |                               |                    |  |                                     |
| 3. Toksičnost na <i>Daphnia magna</i>              | LID <sub>D</sub>              | Faktor razrjeđenja | 3                                      | -                                   |
| 4. Toksičnost na svjetleće bakterije               | LID <sub>L</sub> <sup>*</sup> | Faktor razrjeđenja | 4                                      | -                                   |
| ORGANSKI POKAZATELJI                               |                               |                    |  |                                     |
| 5. KPK <sub>Cr</sub> <sup>**</sup>                 | O <sub>2</sub>                | mg/l               | 125                                    | sukladno članku 5. ovoga Pravilnika |
| 6. Adsorbilni organski halogeni <sup>2</sup> (AOX) |                               | mg/l               | 0,15                                   | 0,15                                |
| ANORGANSKI POKAZATELJI                             |                               |                    |  |                                     |
| 7. Bakar <sup>**3</sup>                            | Cu                            | mg/l               | 0,5                                    | 0,5                                 |
| 8. Cink <sup>**4</sup>                             | Zn                            | mg/l               | 2                                      | 2                                   |
| 9. Ukupni krom <sup>**</sup>                       | Cr                            | mg/l               | 0,5                                    | 0,5                                 |
| 10. klor slobodni <sup>2</sup>                     | Cl <sub>2</sub>               | mg/l               | 0,2                                    | 0,5                                 |
| 11. Ukupni dušik <sup>**</sup>                     | N                             | mg/l               | 15                                     | sukladno članku 5. ovoga Pravilnika |
| 12. Ukupni fosfor <sup>**</sup>                    | P                             | mg/l               | 1,5<br>3 <sup>(d)</sup>                | sukladno članku 5. ovoga Pravilnika |

Oznake u Tablici 6:

\*LID<sub>D</sub>, LID<sub>L</sub> – najmanje razrjeđenje otpadne vode koje nema učinka na test organizme; određuje se najmanje četiri puta godišnje

– Toksičnost na *Daphnia magna* određuje se u slučaju kada se otpadne vode ispuštaju u kopnene vode, a toksičnost na svjetleće bakterije u priobalne vode

$\Delta T_R$  – razlika vrijednosti temperature rashladne vode na ispustu i vrijednosti temperature vode na zahvatu

$\Delta T_P$  – razlika vrijednosti temperature na granici zone miješanja u kopnenim i priobalnim vodama (prijemniku) i vrijednosti temperature vode uzvodno od zahvata

\*\* analiza se radi samo kod recirkulacijskih rashladnih sustava

<sup>(a)</sup> dozvoljena granična vrijednost primjenjuje se kada je temperatura vode na zahvatu viša od 20 °C

<sup>(b)</sup> dozvoljena granična vrijednost odnosi se na područja ciprinidnih voda određena propisom o određivanju područja voda pogodnih za život slatkovodnih riba i na područja priobalnih voda, i to na granici zone miješanja (max 200 metara) koja se određuje na temelju rezultata modeliranja pri projektiranju novog postrojenja, a nakon puštanja postrojenja u rad na temelju mjerenja temperature u zoni miješanja minimalno u razdoblju od 2 godine

<sup>(c)</sup> dozvoljena granična vrijednost odnosi se na područja salmonidnih voda određena propisom o određivanju područja voda pogodnih za život slatkovodnih riba

<sup>2</sup> – analiza se radi u slučaju korištenja biocida

<sup>3</sup> – analiza se radi u slučaju da je rashladni sustav napravljen od materijala koji sadrži bakar

<sup>4</sup> – za kondicioniranje rashladne vode ne smiju se koristiti cinkovi spojevi

<sup>(d)</sup> dozvoljena granična vrijednost odnosi se na slučaj kada se za kondicioniranje vode koriste isključivo anorganski fosforni spojevi.

[14]

Osim zakona propisanih u Republici Hrvatskoj, postoje i mnogi europski zakoni o zaštiti i očuvanju kakvoće vode. „Voda nije kao drugi komercijalni proizvodi, već je naslijeđe koje treba čuvati, zaštititi i postupati s njome kao takvom.“ - ova definicija stoji u Direktivi 2000/60/EZ Europskog Parlamenta i Vijeća te najbolje odražava važnost i količinu potrebne savjesnosti pri postupcima obrade vode. Zbog opširne prirode dokumenata neće se detaljnije objašnjavati već se samo navodi popis nekih važećih propisa:

- [\(CELEX 32000L0060\) Direktiva 2000/60/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 23. listopada 2000. o uspostavi okvira za djelovanje Zajednice u području vodne politike](#)
- [\(CELEX 32006L0118\) Direktiva 2006/118/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 12. prosinca 2006. o zaštiti podzemnih voda od onečišćenja i pogoršanja stanja](#)
- [\(CELEX 31991L0271\) 91/271/EEZ: Direktiva Vijeća od 21. svibnja 1991. o pročišćavanju komunalnih otpadnih voda](#)
- [\(CELEX 32010L0075\) Direktiva 2010/75/EU Europskog parlamenta i Vijeća od 24. studenoga 2010. o industrijskim emisijama \(integrirano sprečavanje i kontrola onečišćenja\) \(preinačeno\) Tekst značajan za EGP](#)

## 8. ZAKLJUČAK

Proučavanje postupaka i izvedbi rashladnih sustava energetike u ovom radu pruža bolje razumijevanje određenih komponenata složenih termodinamičkih, mehaničkih te kemijskih procesa koji se odvijaju kako bi se krajnji produkt, električna energija, doveo do potrošača.

Složenost i nužnost tretmana rashladne vode koja ima nezamjenjivu ulogu u radu energetskih postrojenja, direktno iskazuju važnost spone vode i energije. Kako se više puta spomenulo, uložena energija za tretman i dobavu rashladne vode jednako je bitna kao količina korištene rashladne vode kako bi se energija dobila i tako u krug. Varirajuće učinkovitosti raznih izvedbi rashladnih sustava te njihova primjena uvjetovana lokalnim uvjetima kako bi se maksimizirala proizvodnja energije te ostavio što manji otisak na okoliš, izravno ukazuju na važnu primjenu „zelenijeg“ trošenja vode: jedan od ciljeva prema kojem su orijentirane društvena i ekološka komponenta unaprjeđenja međusobnog dobivanja i trošenja vode i energije.

Pokazano je i kako je pri projektiranju pripreme i obrade rashladne vode posebno važno obratiti pažnju na mogućnost razvoja bakterije *Legionella* koja je jedan od najvećih uzročnika mikrobiološkog zagađenja rashladnih tornjeva i time direktna prijetnja ljudskom zdravlju. Uzimajući u razmatranje faktore rizika, primjenjuju se odgovarajući tretmani te se radi na što učinkovitijem sprječavanju širenja zaraze i bolesti.

Pokazana je i pravna strana proizvodnje energije te njena ograničenja s obzirom na njen negativni okolišni učinak. Razni propisi štite određene aspekte ekosustava dok istovremeno dopuštaju određene parametre za koje se pretpostavlja da neće trajno i štetno djelovati na eko-sustave okolnih rijeka, mora i jezera.

## LITERATURA

- [1] Pan S-Y, Snyder SW, Packman AI, Lin YJ, Chiang P-C.: Cooling water use in thermoelectric power generation and its associated challenges for addressing water-energy nexus, *Water-Energy Nexus* 1(2018) 26-41
- [2] Lohrmann A, Farfan J, Caldera U, Lohrmann Ch, Breyer Ch.: Global scenarios for significant water use reduction in thermal power plants based on cooling water demand estimation, using satellite imagery, *Nature Energy* 4(2019) 1040–1048
- [3] McDermott G, Nilsen OA.: Electricity Prices, River Temperatures and Cooling Water Scarcity, *Land Economics*, 90(2014) 1, 131-148
- [4] <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/cooling-power-plants.aspx> (datum zadnjeg pristupa 14.02.2022.)
- [5] <https://www.ucsusa.org/resources/water-power-plant-cooling#sources> (datum zadnjeg pristupa: 14.02.2022.)
- [6] Hensley, JC.: *Cooling tower fundamentals*, SPX Cooling technologies, Overland Park - Kansas, 2006.
- [7] Suez Water Technologies & Solutions Handbook, <https://www.suezwatertechnologies.com/handbook/cooling-water-systems>, (datum zadnjeg pristupa: 14.02.2022.)
- [8] Zabilješke s predavanja, prof.dr.sc. Davor Ljubas, kolegij Voda, gorivo i mazivo - E, ak .god. 2020./21.
- [9] Aquaprox.: *Treatment of cooling water*, Springer, Levallois, 2009.
- [10] Bartram J, Chartier Y, Lee JV, Pond K, Surman-Lee S.: *Legionella and the prevention of legionellosis*, World Health Organization, 2007.
- [11] Brajković M.: *Postizanje i održavanje kvalitete rashladne vode*, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.
- [12] Sörensen M, Gurrath Ch.: UV-Disinfection of cooling towers, *Water Solutions*, 4(2017) 44-52.
- [13] Zakon o vodama. (NN 066/2019)
- [14] Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda. (NN 026/2020)