

# Projekt rashladnog sustava broda za prijevoz kemikalija

---

**Matošević, Toni**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:647802>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-24**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**PROJEKT RASHLADNOG SUSTAVA BRODA ZA PRIJEVOZ  
KEMIKALIJA**

Rijeka, svibanj 2024.

Toni Matošević

0069076500

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**PROJEKT RASHLADNOG SUSTAVA BRODA ZA PRIJEVOZ  
KEMIČALIJA**

Mentor: Prof. dr. sc. Tomislav Mrakovčić

Rijeka, svibanj 2024

Toni Matošević

0069076500

ZADATAK

## **IZJAVA**

Sukladno članku 9. stavak 1. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod naslovom „Projekt rashladnog sustava broda za prijevoz kemikalija“, uz vodstvo prof. dr. sc. Tomislava Mrakovčića.

U Rijeci, svibanj 2024

Toni Matošević

0069076500

## **ZAHVALA**

Ovim putem zahvaljujem se svojem mentoru prof. dr. sc. Tomislavu Mrakovčiću, koji je uz mnogo razumijevanja i strpljenja uvijek bio voljan pomoći svojim sugestijama. Također zahvaljujem mojoj obitelji i prijateljima koji su uvijek bili uz mene tijekom mog školovanja.

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. BRODSKI RASHLADNI SUSTAV .....	2
2.1. Rashladni mediji.....	2
2.1. Izravno (direktno) hlađenje .....	4
2.2. Indirektno hlađenje .....	5
2.2.1. Konvencionalni sustav .....	7
2.2.2. Centralni rashladni sustav .....	9
3. CENTRALNI RASHLADNI SUSTAV I NJEGOVI ELEMENTI.....	12
3.1. Centralni rashladni sustav .....	12
3.1.1. Osnovne izvedbe centralnog rashladnog sustava.....	13
3.1.2. Potrošnja energije za pogon pumpi.....	14
3.1.3. Automatska regulacija.....	16
3.2. Elementi centralnog rashladnog sustava.....	17
3.2.1. Uisni kolektor morske vode .....	17
3.2.1. Filtri.....	19
3.1.4 Cjevovodi.....	20
3.1.5. Ventili .....	21
3.1.5 Centrifugalne pumpe.....	24
3.1.6. Pločasti izmjenjivači topline .....	25
4. TEHNIČKI OPIS CENTRALNOG RASHLADNOG SUSTAVA NA BRODU ZA PRIJEVOZ KEMIKA LIJA.....	27
4.1. Opće karakteristike broda.....	27
4.1. Centralni rashladni sustav broda.....	28
2.1.1. Sustav morske vode.....	28
2.1.2. Sustav slatke vode .....	29

4.2. Karakteristike glavnog motora .....	32
4.2. Bilanca topline .....	33
5. PRORAČUN CENTRALNOG RASHLADNOG SUSTAVA NA TEMELJU TOPLINSKE BILANCE .....	36
5.1. Proračun promjera dionica .....	36
5.1.1. Proračun cjevovoda morske vode .....	37
5.1.2. Proračun cjevovoda slatke vode niske temperature .....	38
5.1.3. Proračun cjevovoda slatke vode visoke temperature .....	47
5.2. Proračun protoka i padova tlaka u rashladnom sustavu .....	47
5.2.1. Krug morske vode .....	48
5.2.2. Krug slatke vode visoke temperature .....	49
5.2.3. Krug slatke vode niske temperature .....	51
6. ODABIR OPREME BRODSKOG RASHLADNOG SUSTAVA .....	55
7. ZAKLJUČAK .....	58
LITERATURA .....	59
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA .....	61
POPIS SLIKA .....	62
POPIS TABLICA .....	63
SAŽETAK .....	64
ABSTRACT .....	64
POPIS PRILOGA .....	65



# 1. UVOD

Razvoj suvremenih modernih brodova i njihovih sustava obilježen je velikim porastom složenosti potaknut tehnološkim napretkom. Porast snage dizelskih motora uz što manje potrošnje energije zahtijeva razvoj brodskih sustava u vidu pouzdanosti i fleksibilnosti uz optimalno vođenje sustava. Brodski sustavi sve se više usavršavaju zbog kontinuiranog rasta stupnja automatizacije, kao potreba za uspješnim, sigurnim i ekonomičnim održavanjem broda, odnosno prijevoza ljudi i dobara. Jedan od takvih sustava jest sustav rashlade, koji je tema ovog rada.

Brodski motori i ostali strojevi i uređaji svojim radom oslobađaju toplinu koju je potrebno odvesti iz pogonskog sustava, kako ne bi došlo do pregrijavanja. Rashladni sustav služi upravo tome – hlađenje glavnih i pomoćnih brodskih motora, te ostalih pomoćnih strojeva i uređaja kojima je također potrebno odvoditi toplinu. Sustav rashlade također se koristi i za klimatizaciju, hlađenje ulja, hlađenje zraka za prednabijanje, kondenzatora rashladnih uređaja, za održavanje traženih uvjeta tijekom skladištenja raznih namirnica te održavanje potrebne temperature tereta.

Osnovni mediji koji preuzimaju suvišnu toplinu brodskih strojeva i uređaja su morska i slatka voda. Slatka voda cirkulira u zatvorenom cirkulacijskom sustavu, a sva toplina predaje se morskoj vodi koja se na kraju vraća u more. U praksi taj proces može se odvijati na direktni i indirektni način.

Kod projektiranja rashladnog sustava, uzimaju se u obzir standardni projektni uvjeti, pri čemu se posebna pažnja posvećuje zahtjevima kod plovidbe tropskom područjem, kako bi se strojevima osigurao stabilan i pouzdan rad.

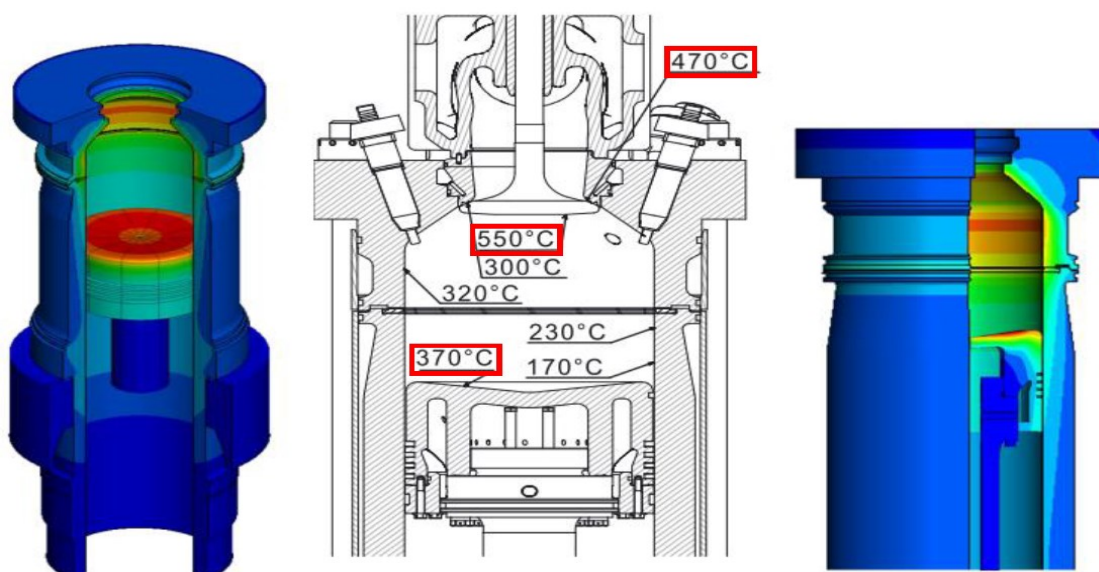
U ovom radu prikazan je rashladni sustav broda za prijevoz kemikalija. Uz tehnički opis rashladnog sustava broda, izrađen je i proračun centralnog rashladnog sustava na temelju toplinske bilance, te prema provedenom proračunu izvršen odabir opreme sustava.

## 2. BRODSKI RASHLADNI SUSTAV

Brodski strojevi tijekom rada stvaraju toplinu koja se mora učinkovito odvoditi kako bi se osigurao njihov pravilan rad i spriječilo pregrijavanje. Glavna svrha rashladnog sustava je hlađenje glavnog pogonskog motora i njegovih dijelova, kao i svih ostalih uređaja koji zahtijevaju odvođenje topline. Brodski sustavi rashlade sastoje se od cjevovoda, izmjenjivača topline, ventila, pumpi, te uređaja koje treba hladiti. Sustavom cirkulacije ulja, vode i zraka omogućava se odvođenje topline. Također, rashladni sustav neprestano se optimizira i unapređuje, naročito s aspekta smanjenja potrošnje energije potrebne za njegov rad, što čini analize takvih sustava sve zahtjevnijima i složenijima.

### 2.1. Rashladni mediji

Svi motori s unutarnjim izgaranjem moraju imati neki sustav koji će ih štiti od pregrijavanja. U motorima s unutarnjim izgaranjem moguće je postići toplinski stupanj iskorištenja do 50% pri pretvorbi kemijske energije sadržane u gorivu u iskoristivi mehanički rad. Preostalih 50 % pripada toplinskoj otpadnoj energiji koju je potrebno odvesti iz motora kako ne bi došlo do pregrijavanja. Ovaj višak topline predstavlja ozbiljan problem, te se zahtijeva dodatni utrošak energije na sustav rashlade koji povećava postotak neto gubitka energije cijelog sustava [1]. Na slici 2.1. prikazane su prosječne temperature stijenki u prostoru izgaranja broskog dvotaktnog dizelskog motora.



Slika 2.1. Prosječne temperature stijenki u prostoru izgaranja broskog 2T dizelskog motora [2]

S obzirom na to, potreban je rashladni sustav s rashladnim medijem koji će odvoditi taj višak topline. U tehnici hlađenja pojavljuje se nekoliko različitih medija ovisno o dostupnosti, zahtjevima za određena termodinamička, fizikalna i kemijska svojstva te zahtjevima o sigurnosti i ekonomskim mogućnostima. Idealni rashladni medij mora biti lako dostupan, visokog specifičnog toplinskog kapaciteta, nekorozivan, s minimalnom mogućnošću zaprljanja rashladnog sustava i što moguće manjim rizikom kontaminacije u slučaju propuštanja. Također, poželjno je da medij rashlade da ima nisku viskoznost kako bi otpor strujanju kroz cijev bio minimalan. Uzimajući u obzir navedena ograničenja, izbor rashladnog medija za rashladni sustav broda sužava se na svega nekoliko mogućnosti: zrak, mazivo ulje i voda.

- **Zrak** – iako su resursi praktički neograničeni, zrak ima relativno nizak specifični toplinski kapacitet od 1.0035 kJ/kgK. Niska gustoća zraka zahtijevala bi veliki protok kako bi se topline adekvatno prenijela. Bez obzira na nepogodnosti, zrak se može koristiti za hlađenje nekih uređaja. Zrakom hlađeni rashladnici koriste se kod nekih manjih pogona, koristeći zrak kao sekundarni medij rashlade
- **Ulje** - prosječni specifični toplinski kapacitet mazivih ulja kreće se od 2 do 2.5 kJ/kgK što rezultira time da se korištenje mazivih ulja se većinom ograničava u situacijama gdje je zahtijevano i podmazivanje. Maziva ulja imaju veći raspon radnih temperatura, iako kod veoma visokih temperatura postoji mogućnost oksidacije i taloženja ugljičnih naslaga. Sintetička ili termalna ulja mogu se koristiti radi povećanja raspona radnih temperatura, iako se termalna ulja češće koriste u svrhu zagrijavanja. Ako postoji mogućnost curenja radnog medija, kao npr. vode u karter motora, hlađenje mazivim uljem postaje preferiran izbor.
- **Morska voda** – morska voda bila bi primarni izbor kad ne bi postojali već asocijativni nedostaci. Jeftina, u obilnim količinama, relativno dobrog specifičnog toplinskog kapaciteta od otprilike 4 kJ/kgK i niskog viskoziteta. Taloženje soli morske vode u cjevovodu povećava se s temperaturom, što jasno smanjuje raspon radne temperature. Neka brodska postrojenja posjeduju mogućnost hlađenja morskom vodom u hitnim slučajevima, ali uglavnom na smanjenom opterećenju. U većini slučajeva morska voda kao rashladni medij koristi se kao sekundaran rashladni medij, i to kod nekih nižih temperatura.
- **Slatka voda** – slatka voda zadovoljava sve zahtjeve, s tim da treba uzeti u obzir da je količina slatke vode na brodu ograničena, te je treba pažljivo skladištiti i/ili proizvesti. Specifični toplinski kapacitet je zadovoljavajuć i iznosi 4,2 kJ/kgK. Raspon temperatura je ograničen s obzirom na nisko vrelište od 100 °C, no ova granica se povećava korištenjem zatvorenog sustava pod tlakom.

Iz ovih razloga u brodskim postrojenjima se slatka voda koristi kao prvi izbor za rashladni medij.

Razvoj sustava hlađenja temelji se na:

1. Učinkovitosti hlađenja, tj. održavanje potrebnih temperaturnih uvjeta za svaku komponentu neovisno o vanjskim uvjetima
2. Korištenju i kontroli morske vode u sustavu hlađenja, odnosno njeno štetno djelovanje (korozija, taloženje, utjecaj galvanskih struja)
3. Ekonomičnosti sustava hlađenja u vidu investicijskih i energetske troškova, kao i troškova održavanja

Rashladni sustav broda moguće je izvesti na više načina. Morska voda javlja se u svim varijantama, ali ne koristi se uvijek na isti način, te upravo zbog toga razlikujemo dvije vrste hlađenja:

1. Izravno hlađenje
2. Neizravno hlađenje

Neizravni sustavi još se dijele na konvencionalne i centralne.

### **2.1. Izravno (direktno) hlađenje**

Izravno (direktno, protočno) hlađenje predstavlja najjednostavniju i najekonomičniju izvedbu sistema hlađenja. Kroz rashladni prostor prolazi uvijek nova količina morske vode, koja se nakon preuzimanja topline vraća natrag u more. Uređaji koji se koriste u direktnom sustavu rashlade jednostavni su i sastoje se samo od cjevovoda, pumpe morske vode, usisne košare te usisnog i ispusnog ventila.

Korištenje morske vode koja struji kroz cjevovod jasno govori o velikim nedostacima ovog sustava. Morska voda odnosno sol, nečistoće te organske tvari u njezinom sastavu štetno djeluju na sustav rashlade. To se naročito vidi na dijelovima gdje voda miruje ili se giba smanjenom brzinom. Stvaranje taloga unutar cjevovoda koji sprječava protok medija, stvaranje kamenca koji onemogućava normalan prijelaz topline s uređaja na rashladni medij i korozivno djelovanje na čelične dijelove sustava su rezultat agresivnog djelovanja morske vode, koje zahtijevaju mjere zaštite (npr. cink-protektori) i potrebe održavanja.

Razlike ulazno – izlaznih temperatura su velike, tj. mogu biti veće od 10-20 °C, jer se temperatura mora kreće u granicama do 32 °C, ovisno o godišnjem dobu i morima kojima brod plovi [3]. Temperatura izlazne morske vode ne smije prelaziti 46 °C, zbog mogućeg taloženja soli na stijenkama rashladnog prostora koji također smanjuje prijelaz topline.

U prosjeku, benzinski motori i brzohodni dizelski motori s izravnim hlađenjem zahtijevaju protok morske vode od 36-39 l/min za svakih 75 kW snage motora. Za usporedbu, motori s neizravnim hlađenjem zahtijevaju veći protok: oko 65-70 l/min za svakih 75 kW motora). [4]

Svaki sustav rashlade, pa i ovaj, izveden je tako da morska voda za hlađenje ulazi u cilindre motora odozdo (preko razvoda) i izlazi na vrhu. Na taj način rashladni prostor motora uvijek je ispunjen rashladnom morskom vodom. U suprotnom, postoji mogućnost stvaranja zračnih i/ili parnih mjehura koji mogu uzrokovat lokalna pregrijavanja.

U današnje vrijeme, radi navedenih prednosti i nedostataka direktno hlađenje koristi se samo kod nekih motora manjih snaga. Direktni sustav hlađenja ne koristi se kod velikih brodskih motora. [1]

## **2.2. Indirektno hlađenje**

Jasni nedostaci direktnog hlađenja bili su razlog traženja alternativnog načina hlađenja koji bi trebao smanjiti štetni utjecaj morske vode. Razvijaju se indirektni sustavi hlađenja, u kojima se slatka voda koristi za hlađenje glavnog motora, i to klipova, cilindara, glava motora, rasprskavača i ulja. U ovom sustavu slatka voda posebno cirkulira za svaki pojedinačni sustav, a nakon što preuzme na sebe otpadnu toplinu, putem izmjenjivača topline predaje ju rashladnoj morskoj vodi.

Struktura indirektnog rashladnog sustava složenija je od direktnog jer ima dva cirkulacijska kruga s različitim medijima. Potrebne su dvije cirkulacijske pumpe, jedna u krugu slatke vode i druga u krugu morske vode, koje su često sličnog kapaciteta. Iz tog razloga, moguće je ugraditi samo jednu rezervnu pumpu, koja je potrebna iz sigurnosnih razloga, odnosno u slučaju kvara.

Količina slatke vode koja cirkulira je uvijek ista. Eventualni gubitci nadoknađuju se s pomoću kompenzacijskog tanka, koji mora biti smješten na određenoj visini kako bi rashladni sustav uvijek bio ispunjen vodom.

Sustav slatke vode u načelu je zatvoren sustav, stoga su ulazne i izlazne temperature vrlo visoke. Obično izlazne temperature sustava iznose od 60 do 90 °C, ulazne od 50 do 70 °C, dok je temperaturna razlika manja nego kod direktnog hlađenja, u granicama između 10 i 15 °C. [3]

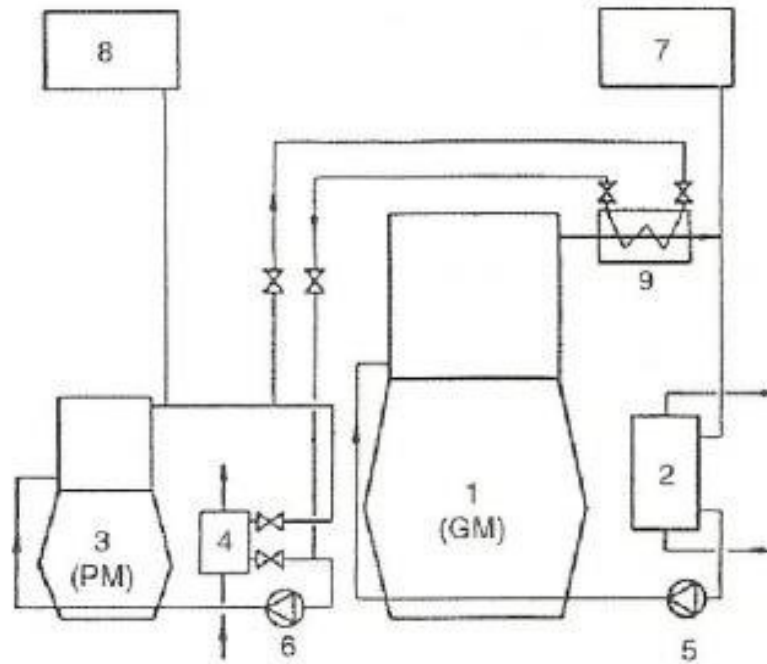
Više izlazne temperature rashladnog sustava pozitivno djeluju na efikasnost cijelog pogona:

- bolji proces izgaranja motora omogućuje mirniji rad motora i povećanje efektivne snage motora
- smanjuje se specifična potrošnja goriva
- omogućava se veća temperatura stijenki košuljica i snižava se viskoznost ulja za podmazivanje, što rezultira povećanjem mehaničkog stupnja iskorištenja
- reducirano ili spriječeno onečišćenje rashladnog prostora (u ovisnosti o kvaliteti vode)
- smanjena mogućnost kondenzacije ispušnih plinova u cilindru
- smanjena mogućnost stvaranja sumporne kiseline i trošenje materijala.

Temperaturu u sustavu regulira se na više načina. Obilazni (by-pass) ventili na rashladnicima koristili su se dugi niz godina, dok u novije vrijeme regulaciju temperature provodi se s pomoću termostatskih ventila kod manjih pogona, te troputnih regulacijskih ventila kod većih pogona.

Prije upućivanja glavnog motora, potrebno je izvršiti njegovo predgrijavanje, do temperature od otprilike 50 °C. Kada je motor zagrijan, zazori između klipa i cilindra su ispravni, podmazivanje funkcionira kako je očekivano i manja je mogućnost nepotrebnog trošenja pokretnih dijelova. U principu se predgrijavanje izvodi na dva načina [3]:

1. Predgrijavanje pomoću grijača slatke vode – koriste se posebni grijači izvedeni u obliku izmjenjivača koji preuzimaju toplinu od vodene pare ili koristeći električnu energiju
2. Predgrijavanje pomoću slatke rashladne vode s pomoćnih motora – otpadnu toplinu s pomoćnih motora koja se uobičajeno odvodi, u ovoj izvedbi, pomoću izmjenjivača topline koristi se za zagrijavanje glavnog motora. Ovakav sustav predgrijavanja prikazan je na slici 2.2.



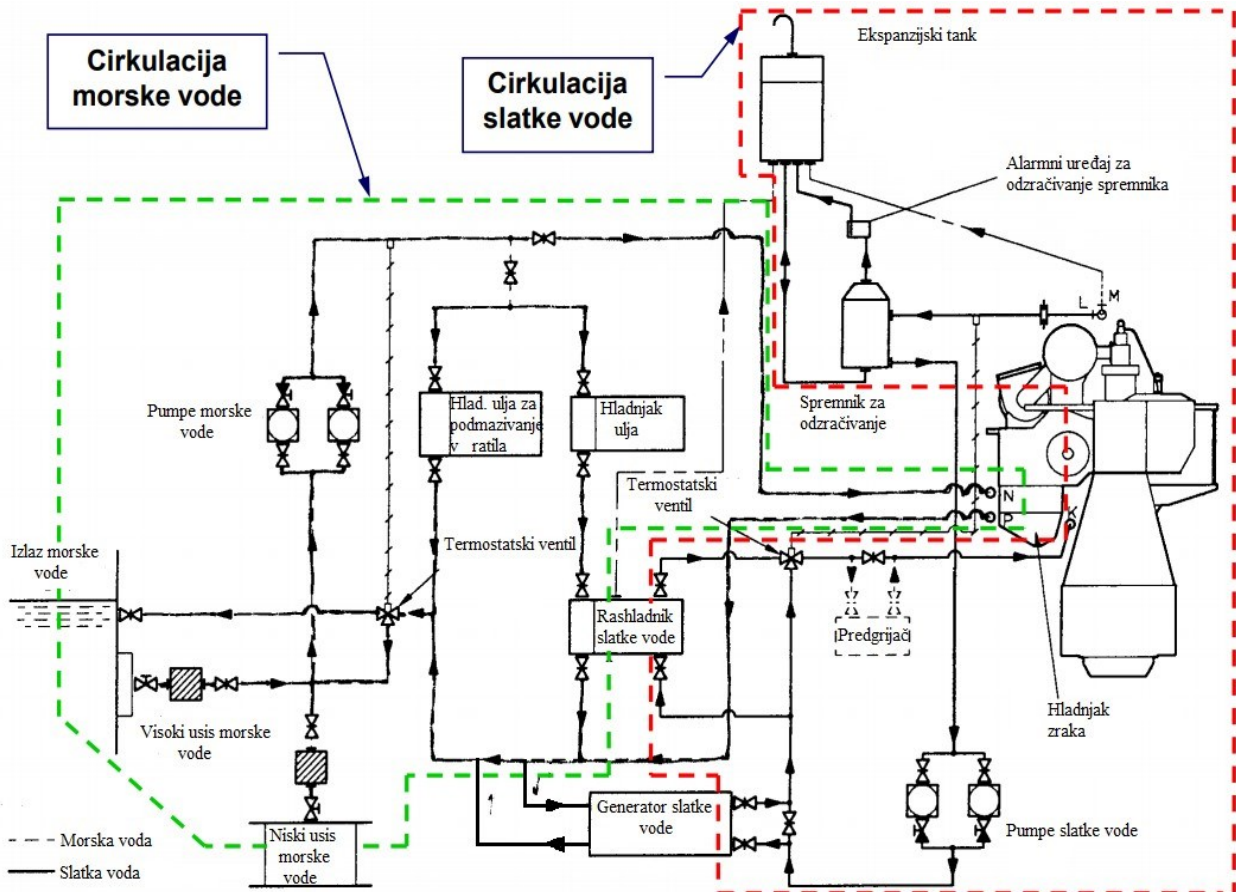
Slika 2.2. Predgrijavanje glavnog motora [3]

1- glavni motor (GM), 2- rashladnik GM, 3- pomoćni motor (PM), 4- rashladnik PM, 5- pumpa slatke vode GM, 6- pumpa slatke vode PM, 7- ekspanzijski tank GM, 8- ekspanzijski tank PM, 9- grijač

Indirektni sustavi hlađenja omogućuju lakšu i pregledniju kontrolu temperatura i tlakova u svakom dijelu sustava. Ovaj način hlađenja još se može podijeliti na konvencionalni i centralni sustav.

### 2.2.1. Konvencionalni sustav

Osim hlađenja cilindra, kod suvremenih brodskih motora s prednabijanjem, mora biti ugrađen sustav hlađenja ulja za podmazivanje, rasprskavača goriva, zraka za prednabijanje i klipova. Konvencionalni sustav rashlade, koji je bio popularan na starijim gradnjama, funkcionira na način da morska voda oduzima toplinu slatkoj rashladnoj vodi u odvojenim rashladnicima, te na taj način regulira temperaturu košuljica motora, klipova, rasprskavača te toplinu ulja za podmazivanje. Shema konvencionalnog sustava prikazana je na slici 2.3.



Slika 2.3. Shema konvencionalnog rashladnog sustava [5]

Do svakog pojedinog rashladnika dolazi cjevovod morske vode, što ukazuje na robusnost sustava. Također, svaki pojedinačni rashladnik i pumpe rashlade instalirani su u paru, gdje jedan element u pogonu a drugi služi kao rezerva. Radi zaštite od korozije i galvanskih struja, cjevovod morske vode mora biti od posebnog materijala (pocinčanog), kao i svi zaporni elementi koji se koriste.

Krug morske vode sastoji se od niskog i visokog usisa, dvije pumpe istog kapaciteta (od čega je jedna rezervna), termostatskog ventila, hladnjaka ulja, hladnjaka ulja za podmazivanje vratila, rashladnika generatora slatke vode, te uz još uređaja ovisno o izvedbi. U sustavu se morska voda koristi i za direktno hlađenje kod nekih elemenata, kao npr. mlaki zdenac, atmosferski i vakuum-kondenzator, rashladnik generatora slatke vode, kondenzator brodske ledenice, klima-uređaj te kod hladnjaka zraka glavnog motora. [3]

Konvencionalni sustav omogućuje da se u slučaju kvara dijela cjevovoda ili uređaja lako reagira zatvaranjem određenog dijela cjevovoda. Postupak servisiranja može se nesmetano obaviti dok je glavni motor u radu.



S druge strane, materijali cjevovoda, izmjenjivača topline i armature iziskuju velike troškove. Također, u zatvorenom sustavu ograničena je količina slatke vode, te je od značaja njezino tretiranje i održavanje.

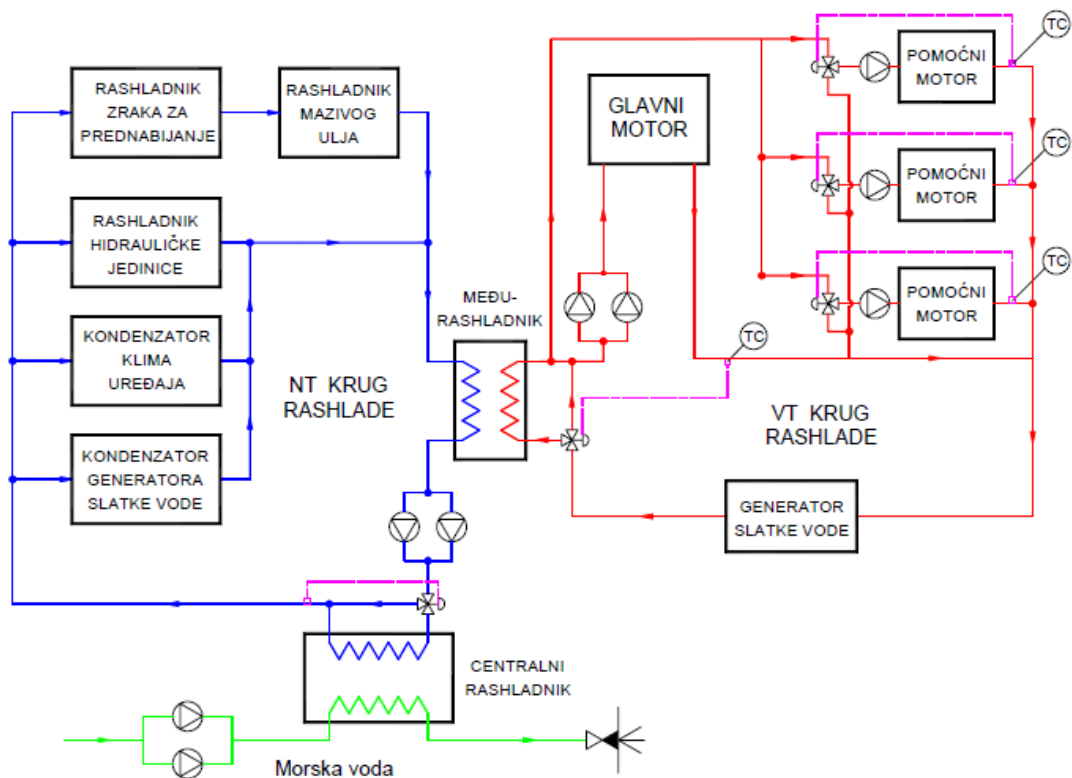
Hlađenje košuljica, klipova, rasprskaca i ulja za podmazivanje slatkom vodom odvija se u odvojenim podgranama sustava jer su parametri tlaka i temperature u svakom od ovih dijelova odvojeni.

Prednosti konvencionalnog sustava očituju se u nižim početnim troškovima investicije, korištenju samo dva seta pumpi (morska i slatka voda) te u jednostavnosti izvedbe cjevovoda rashladnog sustava. S druge strane, materijali cjevovoda i armature u krugu morske vode cjenovno su skuplji te iziskuju dodatnu pozornost kod održavanja. [5]

### 2.2.2. Centralni rashladni sustav

Centralni rashladni sustav predstavlja tehnički najbolje rješenje, a koje je ujedno i ekonomski prihvatljivo. U ranim fazama gradnje broda zahtijeva veće investicijske troškove zbog svoje kompleksnosti, dok u konačnosti omogućava minimalnu potrošnju energije uz niske troškove održavanja. Glavna karakteristika centralnog sustava jest da morska voda preuzima toplinu samo u jednom glavnom hladnjaku (izmjenjivaču topline), dok se svi uređaji hlade slatkom vodom, koja nakon što preuzme otpadnu toplinu sa svih elemenata u sustavu, predaje ju morskoj vodi u tom centralnom rashladniku.

Sustav se dijeli na 3 glavna dijela: sustav morske vode, sustav slatke vode niske temperature i sustav slatke vode visoke temperature. Krug slatke vode podijeljen je na krug slatke vode niske temperature i krug slatke vode visoke temperature, iz razloga što su temperature medija za rashladu glavnog i pomoćnih motora previsoke za hlađenje ostalih komponenti u sustavu. Primjer sheme centralnog rashladnog sustava sa označenim podsustavima prikazan je na slici 2.4.



Slika 2.4. Shema centralnog rashladnog sustava [6]

Sustav morske vode funkcionira na način da pumpa morske vode usisava morsku vodu preko usisnih košara i filtra, provodi ju kroz centralne rashladnike te ju zagrijanu (za cca 10 °C) vraća u more. I ovdje su elementi izvedeni u paru, odnosno jedna pumpa i jedan rashladnik su rezervni.

Sustav visoke temperature služi za hlađenje glavnog pogonskog motora i pomoćnih motora, te za zagrijavanje kod generatora slatke vode. Uobičajeno se izlazne temperature rashladne vode (nakon prolaza kroz glavni motor) kreću između 75 i 85 °C. Rashladna voda cirkulira pomoću dvije cirkulacijske pumpe. Uz njih, u sustavu se još nalaze kompenzacijski tank i deareator. Sustav visoke temperature je pomoću troputnog regulacijskog ventila spojen sa sustavom niske temperature.

Uređaji kod kojih se javljaju niže temperature potrebne za hlađenje dio su sustava niske temperature. Ovdje su uključeni rashladnik ulja za podmazivanje, rashladnik zraka za prednabijanje, kondenzator klima uređaja i rashladnici ostalih uređaja. I ovdje je cirkulacija rashlade vode omogućena s dvije cirkulacijske pumpe. U ovom krugu temperatura medija je otprilike 37 °C [marineonlineyou.blogspot] [7]. Rashladna slatka voda niske temperature predaje višak topline u centralnom rashladniku (izveden u paru, jedan u funkciji a drugi rezervni). Troputni

termoregulacijski ventil spojen preko bypassa regulira protok slatke rashladne vode koja protječe kroz centralni rashladnik.

Glavne prednosti centralnog rashladnog sustava leže u tome da je samo jedan rashladnik hlađen morskom vodom, i cjevovod u tom krugu je relativno kratak. Svi ostali rashladnici i pripadajući cjevovod kroz koji struji slatka voda mogu biti izvedeni od jeftinijih materijala. Također, pomoću podsustava niže i više temperature omogućuje se regulacija temperature i njeno bolje iskorištavanje kroz uređaje u sustavu. [5] [3]

Među nedostatke centralnog rashladnog sustava možemo ubrojati više troškove investicije te potrebu za 3 seta pumpi.

Kompleksnost centralnog rashladnog sustava očituje se kroz velik broj elemenata, složenost cjevovoda te potrebom za regulaciju temperatura u podsustavima uz promjenjive radne parametre. U ovom radu će se ovaj sustav i njegovi elementi dodatno analizirati u sljedećem poglavlju.

### **3. CENTRALNI RASHLADNI SUSTAV I NJEGOVI ELEMENTI**

Već je spomenuto kako centralni rashladni sustav, koristeći podsustave od kojih se sastoji (morska voda, slatka voda visoke temperature i slatka voda niske temperature) omogućuje precizniju kontrolu parametara tlaka i temperature u pojedinim dijelovima cjevovoda odnosno kod pojedinih uređaja. U ovom poglavlju detaljnije će se pokazati različite izvedbe centralnih rashladnih sustava te će biti objašnjen prijenos topline s pomoću vode koja cirkulira.

#### **3.1. Centralni rashladni sustav**

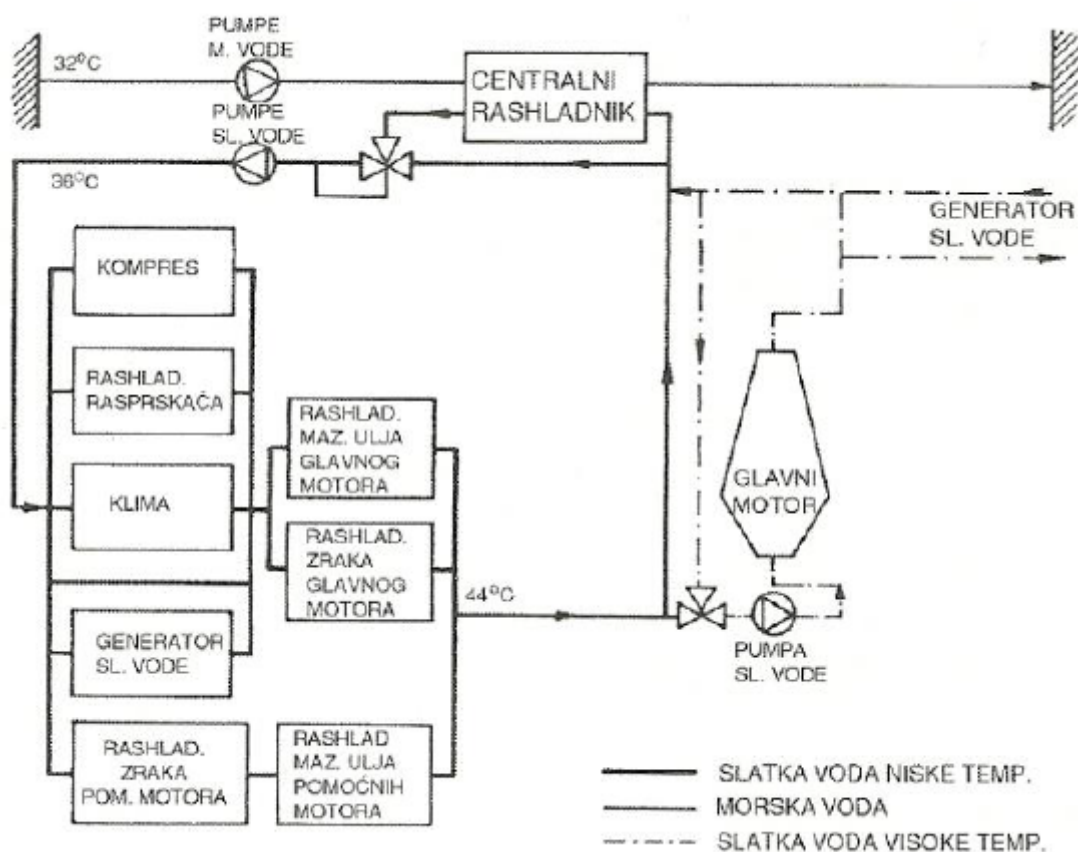
Sav prijenos topline u sustavu obavlja se u rashladnicima, koji u centralnim rashladnim sustavima rade u specifičnim uvjetima. Tijekom rada izmjenjuje se znatna količina topline, premda su razlike temperatura između medija relativno male. Elementi koji se ovdje koriste većinom su pločasti izmjenjivači topline, koji su vrlo kompaktni te ostvaruju visoke koeficijente prolaza topline. Kod brodskih motora većih snaga ponekad je potrebno koristiti i više od dva centralna rashladnika. Protok morske vode obično je dvostruko veći od protoka slatke vode, pri čemu pad tlaka na strani morske vode obično iznosi 100-200 kPa. [3]

Pločasti izmjenjivači topline mogu se još koristiti i u mnogim drugim slučajevima, kao npr. pri hlađenju rasprskavača goriva, mazivog ulja pomoćnih motora, kondenzatora generatora slatke vode, hlađenju provijanta i klimatizacije, turbina i reduktora glavnog pogonskog motora i slično.

Izgaranjem goriva u cilindru oslobađa se toplina, a površine putem kojih se ta toplina prenosi su površina klipa, glava cilindra i košuljica. Ako se za hlađenje klipova koristi rashladna voda, potrebno je koristiti poseban rashladnik jer voda koja se koristi bude zaprljana zbog propuštanja ulja iz teleskopskih cijevi, te može onečistiti ostatak sustava. Raspon temperatura rashladne vode kreće se između 55 ° i 85 °C (izlaz iz klipova). U današnje vrijeme se za hlađenje klipova uglavnom koristi ulje. [3]

### 3.1.1. Osnovne izvedbe centralnog rashladnog sustava

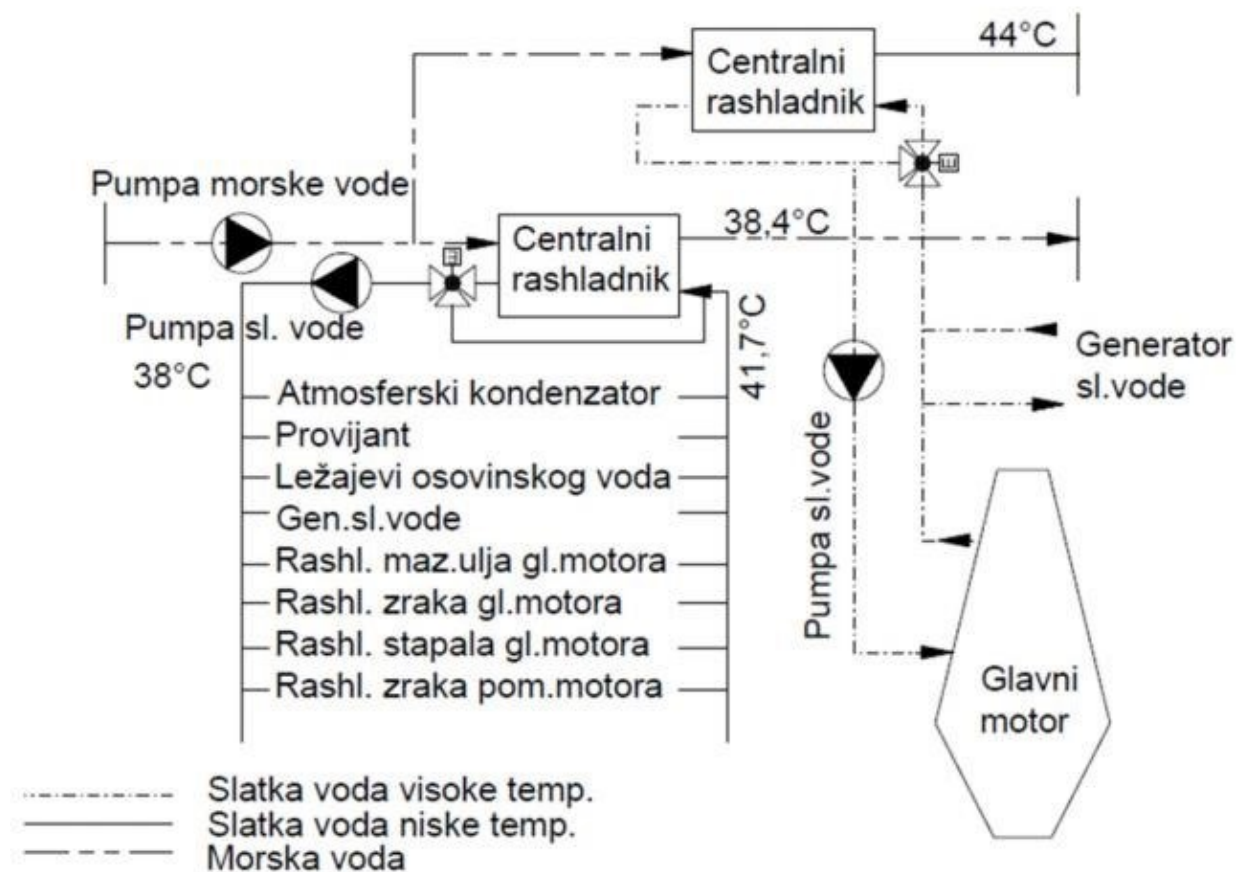
Kao što je već spomenuto, centralni rashladni sustav sastoji se od tri podsustava kroz kojih struji morska voda, slatka voda niske temperature te slatka voda visoke temperature. Shema centralnog rashladnog sustava, kod koje je spojen sustav visoke i sustav niske temperature prikazana je na slici 3.1.



Slika 3.1. Centralni rashladni sustav sa spojenom niskotemperaturnom i visokotemperaturnom cirkulacijom [3]

U praksi se često susreće centralni rashladni sustav u kojem su krug visoke temperature i krug niske temperature odvojeni, slika 3.2.. U takvom sustavu koristi se dodatni rashladnik rashladne vode za hlađenje cilindra motora, a koji se hladi pomoću morske vode. U tom slučaju taj se dodatni rashladnik smješta paralelno s centralnim rashladnicima, a može biti i u seriji. Na nekim brodovima se koristi slatka voda iz cirkulacije sustava niske temperature za hlađenje rashladne vode cilindra u odvojenom rashladniku [3]. Dimenzije rashladnika koji će se koristiti ovisit će o

rasponu temperatura pri izmjeni topline, protoku medija (morske vode) te dopuštenom padu tlaka u rashladniku na strani morske vode.



Slika 3.2. Centralni rashladni sustav s odvojenom niskotemperaturnom i visokotemperaturnom cirkulacijom [3]

### 3.1.2. Potrošnja energije za pogon pumpi

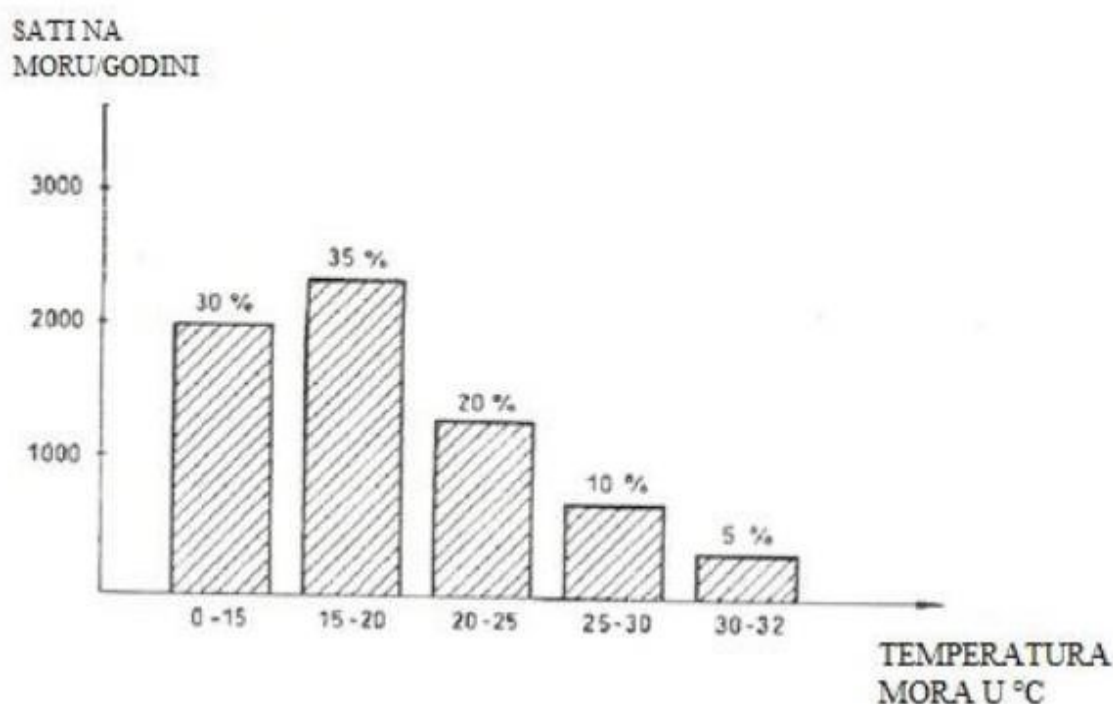
Kod projektiranja brodskih rashladnih sustava, koriste se standardizirani projektni uvjeti u ovisnosti o geografskim područjima u kojima će brod ploviti. Tropska područja oko ekvatora zahtijevaju najveću pozornost, s obzirom na to da je predviđena temperatura mora od 32 °C i temperatura zraka od 45 °C. [5]

Uzimajući u obzir raspon temperatura u sustavu, osnovni zadatak jest postizanje što je moguće manjih temperaturnih razina slatke rashladne vode u cirkulaciji. Temperaturna razina od 35 °C prikazala se djelotvornom u sustavima rashlade, a u pojedinim slučajevima prihvaćalo se i do

38°C. Što je temperaturna razina slatke vode u cirkulaciji veća, troškovi investicije u pripremljenoj fazi gradnje broda bili bi manji. Energetski troškovi bi također bili manji jer bi se mogli koristiti manji rashladnici i pumpe manje snage. [3]

Nadovezano na to, s nižom temperaturom rashladne vode, hladnjak zraka i hvatač vodene magle uspješnije će uklanjati vodu iz komprimiranog zraka za ispiranje dok se brod nalazi u lokalitetu s vlažnim, toplim zrakom. Ovo ima pozitivan utjecaj na stanje u cilindru jer se smanjuje razina vlage u plinovima izgaranja, a time i tendencija kondenzacije kiselina na stijenci košuljice. [8]

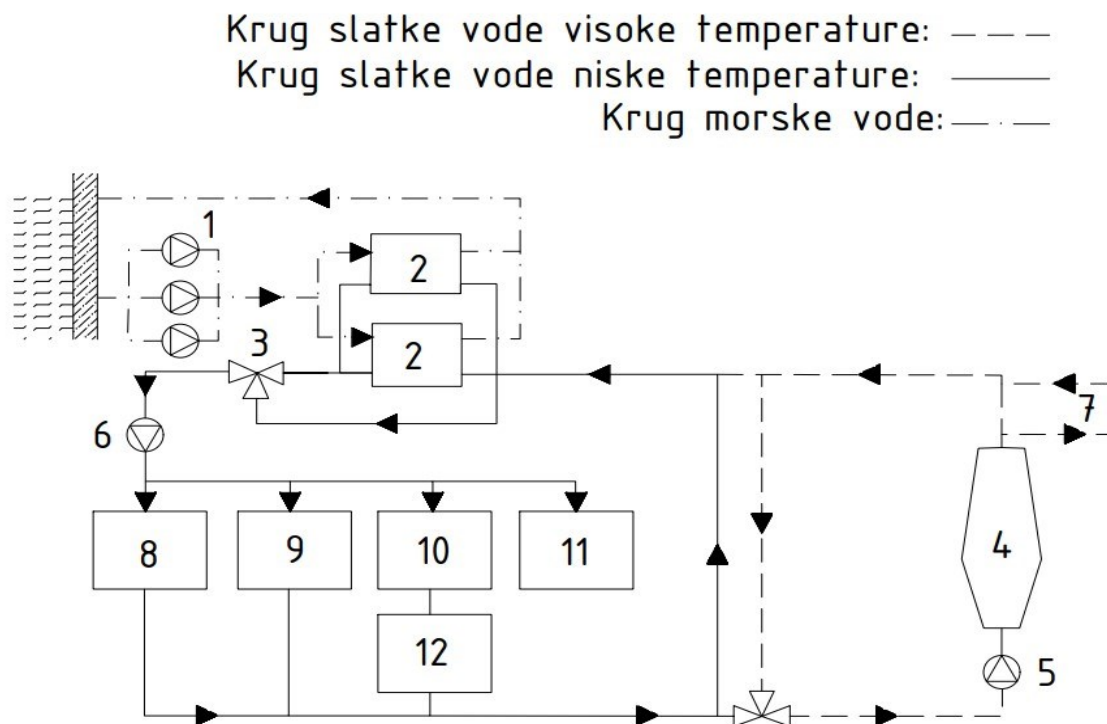
Jasno je da što je veća temperatura mora to će cirkulacijske pumpe morati veću količinu vode tlačiti kroz cjevovod, što znači da će raditi pri većem opterećenju, što konačno rezultira većim troškovima energije. Brodski pogoni uglavnom rade u uvjetima s promjenjivim temperaturama morske vode, koje se najčešće kreću između 15-20°C, slika 3.3.



Slika 3.3. Plovidba broda u ovisnosti o temperaturi mora [3]

Jedan od načina za poboljšanje ekonomičnosti sustava jest korištenje tri pumpe morske vode, od koje će jedna služiti kao rezerva a drugu će pogoniti dvobrzinski motor. U praktičnom smislu, kada je brod u navigaciji koristi se pumpa s jednobrzinskim motorom, kada je brod u luci i na upola smanjenim okretajima se upotrebljava druga pumpa s dvobrzinskim motorom, a treća će služiti kao rezerva. Koristeći sustav s tri

pumpe dobiva se potreban kapacitet pumpi u ovisnosti o temperaturi mora. Na slici 3.4. prikazana je shema centralnog rashladnog sustava s tri pumpe morske vode



*Slika 3.4. Centralni rashladni sustav s tri pumpe [3]*

1 – pumpe morske vode, 2 – centralni rashladnik, 3 – troputni termostatski ventil, 4 – glavni motor, 5 – pumpa slatke vode visoke temperature, 6 – pumpa slatke vode niske temperature, 7 – prema destilatoru, 8 – rashladnik pomoćnih motora, 9 – rashladnik pomoćnih službi, 10 - rashladnik mazivog ulja, 11- rashladnik zraka, 12 – rashladnik vode stapova glavnog motora

### 3.1.3. Automatska regulacija

U današnjim sustavima fokus je na sve većoj automatskoj regulaciji sustava. Elektronički potpomognuta automatska regulacija temperatura, tlakova i protoka kroz rashladne sustave neprekidno se razvija u cilju smanjenja potrošnje energije i



optimizacije efikasnosti sustava. Ovakav sustav omogućuje stalnu kontrolu temperature u niskotemperaturnom i visokotemperaturnom krugu, minimalnu potrošnju energije za pogon pumpi morske vode kao i njihovo uključivanje i isključivanje.

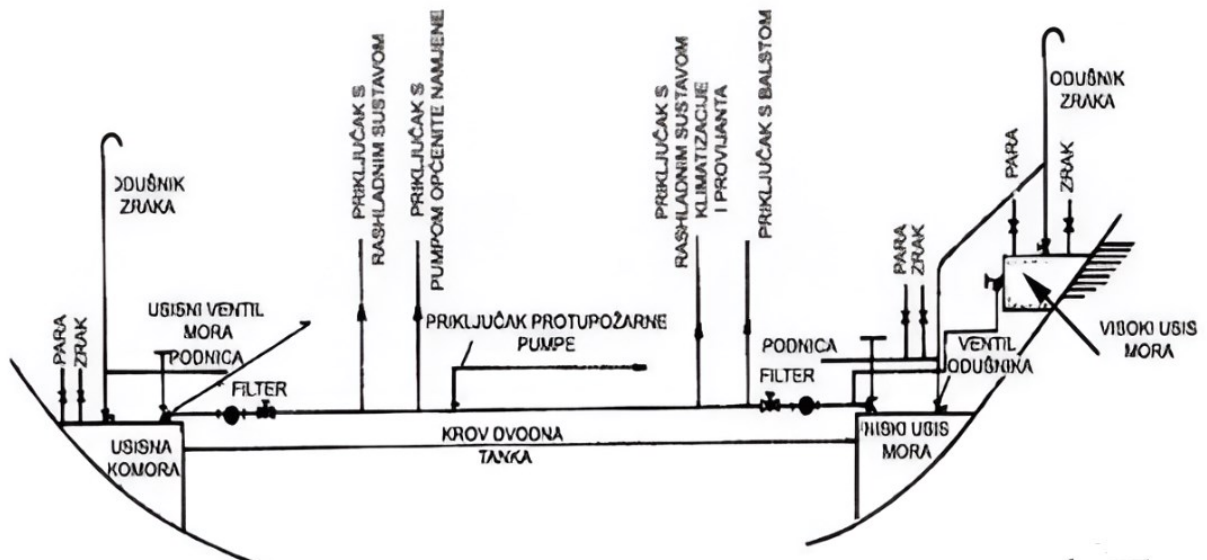
Ovakav sustav koristi mikroprocesorsku jedinicu koja je s električnim signalima povezana sa svim sensorima, regulacijskim ventilima i pumpama u sustavu. S pomoću regulacijskog ventila kontrolira se temperatura za oba kruga slatke vode. Parametri slatke vode očitavaju se s pomoću senzora, a očitane vrijednosti uspoređuju se s protokom morske vode koji će se mijenjati tako da omogući stalnu temperaturu u krugu niske temperature slatke vode. Pumpe vode u sustavu automatski će se uključivati ili isključivati ovisno o potrebi za promjenom protoka kada temperatura ne bude u zadanim granicama. Automatski sustav upravljanja omogućuje da se brodskim pogonom upravlja na daljinu, odnosno iz centralnog kontrolnog prostora.

## **3.2 Elementi centralnog rashladnog sustava**

Centralni rashladni sustav sastoji se od nekoliko elemenata koji omogućuju hlađenje i cirkulaciju rashladnog medija, a to su: usisni kolektor morske vode, filtri, cjevovod, armatura, pumpe i izmjenjivači topline. Svaki od ovih elemenata ima svoju određenu funkciju u cirkulacijskom krugu te će u nastavku biti detaljnije opisani.

### **3.2.1. Usisni kolektor morske vode**

Sustav morske vode predstavlja otvoreni cirkulacijski krug. Morska voda se u brod usisava s pomoću dva usisa morske vode, visokog i niskog usisa, prikazani na slici 3.5. Kada se brod nalazi u plitkim vodama (npr. u rijekama ili u luci) koristi se visoki usis, kako se ne bi usisavala nečista i muljem zaprljana voda koja bi vrlo brzo nataložila se na filteru. S druge strane, kad je brod na otvorenom moru koristi se niski usis. Veći brodovi obično se opremaju jednim visokim i dva niska usisa koji su povezani cjevovodom. [3]



Slika 3.5. Shema usisa morske vode [3]

Usisne košare ne bi smjele biti smještene se na mjestima gdje se pojavljuju intenzivne turbulencije morske vode niti smještene u prostorima pogodnima za akumuliranje zraka, a forma usisa mora biti optimalno izvedena odmah ispod ravne kobilice broda. [3]

U fazi projektiranja broda analizira se dubina uranjanja usisa mora kod lake vodene linije broda i pri kutovima valjanja kako ne bi došlo do izlaza usisa iznad vodene linije, pogotovo u nemirnom stanju mora tijekom nevremena. Usisna košara se odzračuje s pomoću odušnika, a hidrodinamički oblik same košare smanjuje vrtloženje.

Usisna košara uobičajeno se sastoji od odušnika, katodne zaštite, usisne rešetke te priključcima za propuhivanje zrakom i parom. Rešetka služi za sprječavanje ulaska većih predmeta i nečistoća u komoru i mora biti izvedena na način da što manje remeti tok morske vode. Razmak između rebara rešetke je najmanje 25 mm, dok omjer koji čini čista površina rešetke i površina ventila usisa mora biti od 1,5 do 2 puta veći od cjelokupne površine usisa smještenih na komori. Kako je u pitanju morska voda, izgrađuju se od pocinčanog lima s cink-protektorima te vijcima i maticama od nehrđajućeg čelika. [3]

Ventil usisa mora smješta se direktno na usisnu komoru mora i obavezno mora biti atestiran od Registra prema standardima i propisima prema kojima je brod građen. Postoji mogućnost daljinskog upravljanja ventilom ako je prostor za upravljanje nepristupačan.

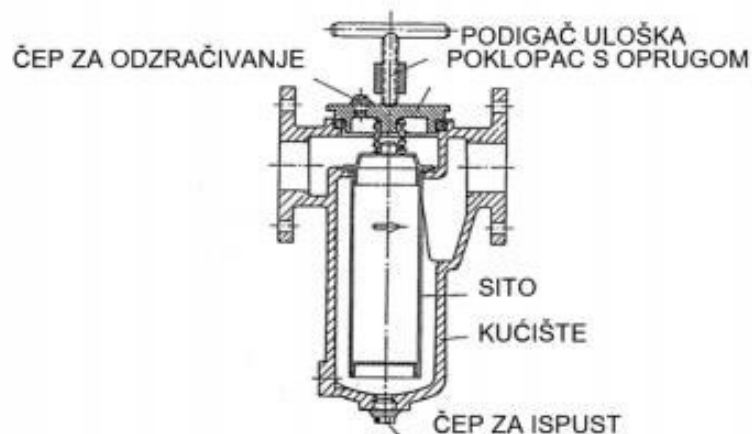
Uz ventil, ugrađuje se i grubi filter morske vode koji mora zaustavljati prolaz grubih nečistoća većih od 10 mm. Omjer svjetle površine rupica u filtru prema površini usisnog ventila ne smije biti manji od 2:1, a ako je filtriranje finije, omjer mora biti još veći. [3]

### 3.2.1. Filtri

Filtri su elementi koji poput mreže koja fizički priječi prolaz svim krutim česticama štite stroj ili uređaj od raznih nečistoća i čestica koje se nalaze u tekućini pripadnog sustava. Ove nečistoće negativno utječu na rad stroja ili uređaj na način da smanjenjem protoka u cjevovodu mogu blokirati rad pumpe, začepiti otvor rasprskavača goriva, oštetiti kliznu površinu ležaja i sl. Neki filteri koriste se u svrhu zaštite pumpi na način da se ugrađuju na usisnu cijev pumpe, kao što je npr. usisni filter morske vode. Drugi se pak instaliraju na tlačni cjevovod pumpe, kada im je funkcija zaštita stroja ili uređaja kojeg pumpa opslužuje.

Odabir filtra ovisi o mediju koji struji kroz njega i njegovim određenim radnim parametrima kao što su tlak, temperatura, protok, viskoznost te na kraju sam materijal, izvedba i finoća filtra. Prema finoći, dijelimo ih na grube, fine i najfinije. Većina filtra koji se koriste na brodovima spada u grube filtre koji zaustavljaju čestice većih dimenzija (od 1 do 3 mm promjera). [9]

Filter se sastoji od kućišta i filtarskog uloška koji služi za čišćenje. Na brodovima se javljaju tri izvedbe filtra: filter sa sitom, filter s lamelama i magnetski filter. Na slici 3.6. prikazan je filter sa sitom.



Slika 3.6. Filtar sa sitom [9]

Posljedica strujanja tekućine kroz filter je određeni pad tlaka. Pad tlaka se povećava sa zaprljanosti filtra, ali mora se naglasiti da nepostojanje pada tlaka ukazuje na drugi problem, a to je oštećenje filtra ili neodgovarajuću ugradnju filtarskog elementa. Takav filter ne ostvaruje svoju ulogu zaštite te može doći do ozbiljne štete na strojevima ili uređajima. [10]

### 3.1.4 Cjevovodi

Brodski cjevovodi predstavljaju izuzetno važan dio brodske opreme i s pravom im se dodjeljuje naziv „krvotok broda“. Brodski cjevovodi služe za provođenje različitih medija brodskih sustava, a neki od tih medija su: goriva, mazivo ulje, morska i slatka rashladna voda, sanitarni i podni izljevi, komprimirani zrak itd. Dobavom medija omogućava se normalno funkcioniranje brodskih strojeva i uređaja.



*Slika 3.7. Detalj smještaja cjevovoda u strojarnici [11]*

Cijevi se izrađuju od raznih materijala ovisno o njihovoj namjeni [11]:

- Čelične cijevi – dijelimo ih na šavne i bešavne
  - Šavne
  - Bešavne
- Cijevi iz obojenih metala

- Bešavne
  - Bakrene vučene
  - Mjedene vučene
  - Yorcalbro
  - Cunifer
  - Nehrđajući čelik
- Šavne
  - Nehrđajući čelik
  - Bakrene
  - Yorcalbro
  - Cunifer
- Plastične cijevi
  - PVC (poliviniklorid)
  - GRP (glassfibre reinforced polyester – staklom ojačana plastika)

U brodogradnji najviše se upotrebljavaju čelične bešavne cijevi u skladu sa standardom SB 1367, tj. prema HRN C.B5.221 odnosno DIN 2448. [11]

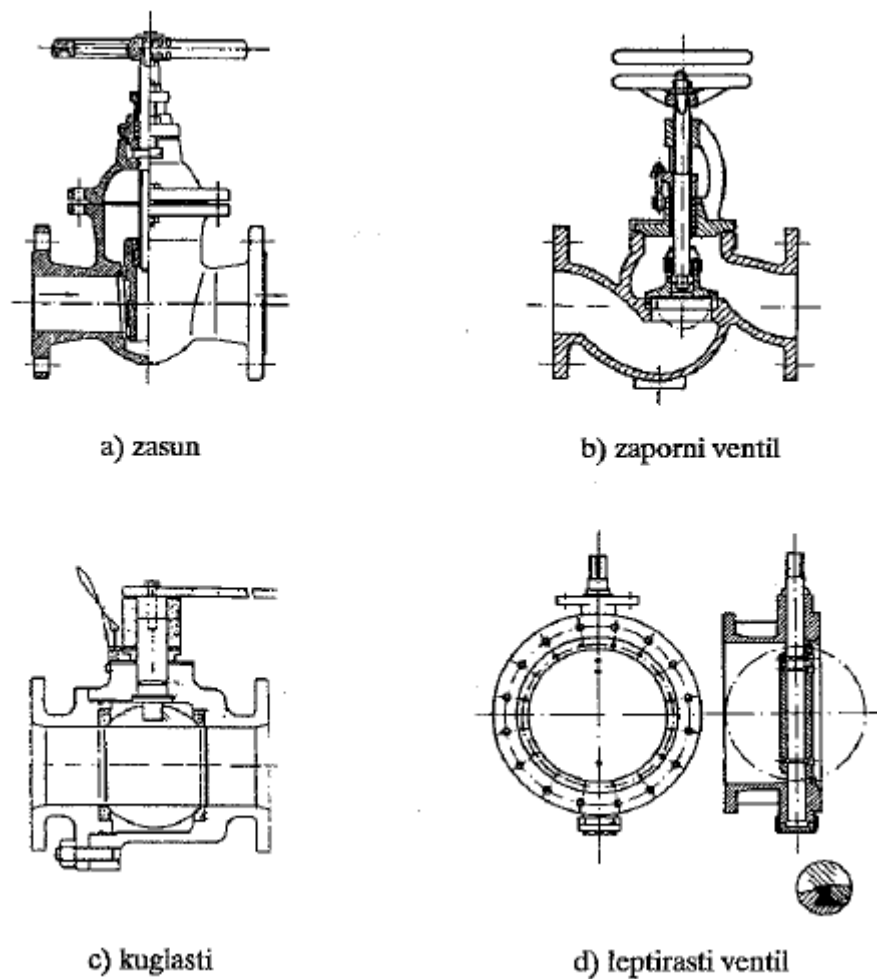
Cunifer cijevi (sastav je 87 % Cu, 10 % Ni, 1 % Fe, Mn) polako istiskuju yorcalbro cijevi (76 % Cu, 22 % Zn, 2 % Al) radi niže cijene te lakše izrade i nabavke. Osim navedenih, u praksi se susreću i olovne cijevi iz sivog lijeva, koje zamjenjuju PVC i Cunifer cijevi.

### 3.1.5. Ventili

Ventili su elementi koji svojim otvaranjem i zatvaranjem omogućuju regulaciju, usmjeravanje i kontroliranje strujanja medija unutar cjevovoda. Traženo stanje strujanja unutar cjevovoda ponekad zahtijeva dinamičko otvaranje i zatvaranje ventila pa se iz tog razloga razvilo nekoliko načina upravljanja ventila: električno upravljanje, hidrauličko te pneumatskim aktuatorima.

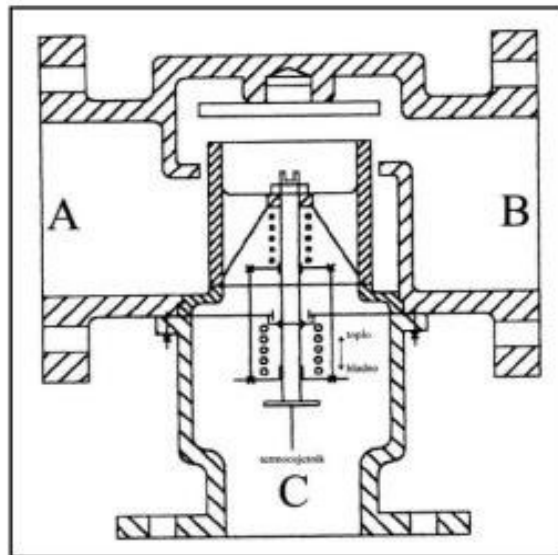
Kod brodskih ventila razlikujemo zaporne ventile (ventili za zatvaranje protoka fluida), zaporno-regulacijske ventile (zatvaranje i prigušivanje izvodi se ručno ili s pomoću dijelova s prisilnim upravljanjem), ventile s automatskim zatvaranjem (promjenom tlaka i brzine smjera strujanja), ventile kao radne dijelove sustava (pumpi, puhala, motora, kompresora) i ventile za specijalnu namjenu. [3]

Zaporni ventili koriste se za potpuno ili djelomično zatvaranje protoka medija kroz cijevni dio te se najviše ugrađuju u brodskim postrojenjima. Na slici 3.8. prikazane su osnovne vrste zapornih ventila: zasuni, ravni, kuglasti i leptirasti.



*Slika 3.8. Različite vrste zapornih ventila [3]*

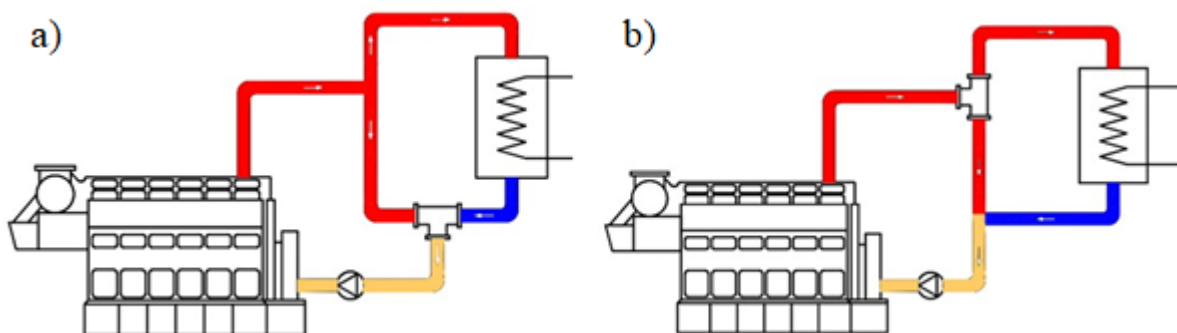
U svrhu centralnih rashladnih sustava potrebno je naglasiti korištenje tropsnog termostatskog ventila. Njegova osnovna namjena jest održavanje odgovarajuće temperature rashladne vode u rashladnom sustavu, a to se postiže adekvatnim miješanjem različitih struja medija. Njegova izvedba prikazana je na slici 3.9.



Slika 3.9. Troputni termostatski ventil [5]

Pomicanjem vretena ventila regulira se protok fluida kroz tijelo ventila te na taj način dolazi do miješanja struja različitih temperatura, a rezultatna mješavina bude adekvatne temperature. Vreteno ventila pomiče se uz pomoć vanjskog pogona odnosno elektromagnetskog, hidrauličkog, pneumatskog ili elektromotornog aktuatora. [5]

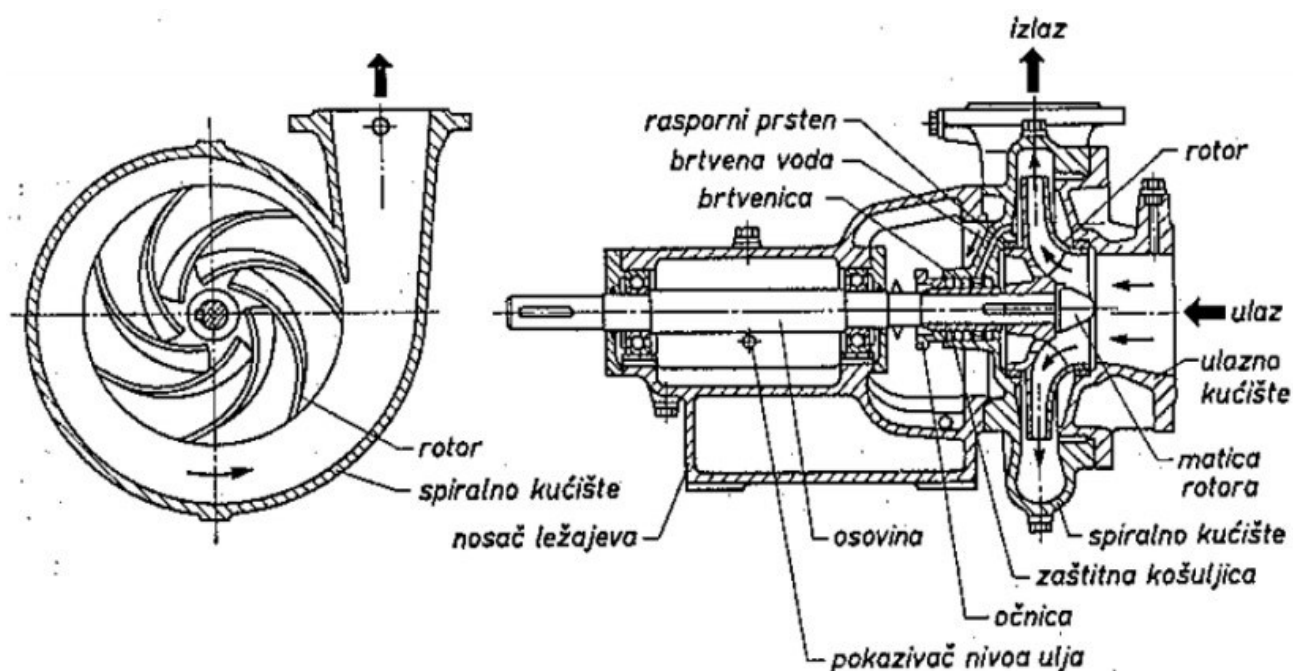
Troputni ventili imaju dva ulaza i jedan izlaz kad se koriste kao miješajući ventili ili jedan ulaz i dva izlaza kad se koriste kao ventili za razdvajanje struje (slika 3.10.). U centralnim rashladnim sustavima češće se koriste kao ventili za razdvajanje, pogotovo kao by-pass kod rashladnika. [marineonlineyou.blogspot]



Slika 3.10. Termostatski ventil instaliran kao miješajući ventil (a) i kao ventil za razdvajanje struje (b) [5]

### 3.1.5 Centrifugalne pumpe

Centrifugalne pumpe su strojevi kroz koje tekućina protječe od smjera crpljenja prema tlačnoj strani uz pomoć centrifugalne sile koja u radijalnom smjeru potiskuje tekućinu između lopatica rotora. Koriste se najviše za male i srednje dobavne visine i za velike dobavne količine pri povećanim brzinama strujanja, dok kod manjih količina i brzina nisu prikladne. Nisu samocrpne, tj. nisu u mogućnosti iscrpiti zrak iz usisnog cjevovoda. Presjek centrifugalne pumpe prikazan je na slici 3.11. [9]



Slika 3.11. Dijelovi centrifugalne pumpe [9]

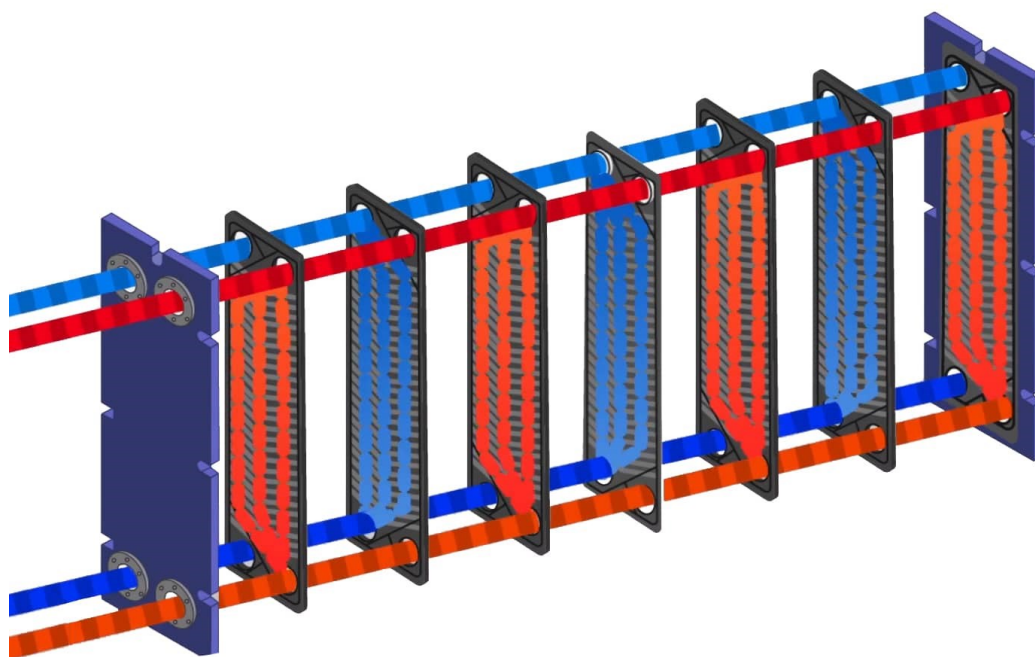
Centrifugalne pumpe sastoje se od spiralnog kućišta i rotora koji je pričvršćen na vratilu. Kućište (stator) vezano je na ulazni i izlazni cjevovod crpke. Rotor je radni dio centrifugalne pumpe koji svojom vrtnjom povećava tlak i kinetičku energiju tekućine. S obzirom na strujanje u rotoru, centrifugalne pumpe mogu biti radijalne, poluradijalne i aksijalne. Vratilo se vrti velikim brzinama i na taj način rotor potiskuje fluid koji se nalazi među lopaticama. Djelovanjem centrifugalne sile mehanička energija na rotoru pretvara se u tlačnu energiju tekućine. Uz kontinuiran protok tekućine kroz kućište, s konstantnim tlakom i protokom, pumpa omogućuje veliku dobavu uz relativno male dimenzije. [9] [12]



Kod brodskih postrojenja koriste se u svrhu prijenosa različitih fluida s potrebnim tlakom i protokom (npr. dobava goriva iz skladišnih tankova u dnevne tankove) te u svrhu cirkulacija kapljevina unutar sustava (npr. cirkulacija rashladne vode).

### 3.1.6. Pločasti izmjenjivači topline

Zbog svoje kompaktne strukture, jednostavnosti i efikasnosti pločasti izmjenjivači topline su u današnje doba najpopularniji izmjenjivači topline u brodskim postrojenjima. Kao što je prikazano na slici 3.12, pločasti izmjenjivači sastoje se od određenog broja tankih metalnih ploča u kontaktu. Svaka od ploča ima četiri otvora koji služe kao ulazni i izlazni otvori i brtve dizajnirane za usmjeravanje medija kroz žljebove na pločama. Žljebovi ploča stvaraju kompleksne prolaze kroz koje prilikom prolaza fluida stvaraju se turbulencije u strujanju koji pospešuje izmjenu topline.

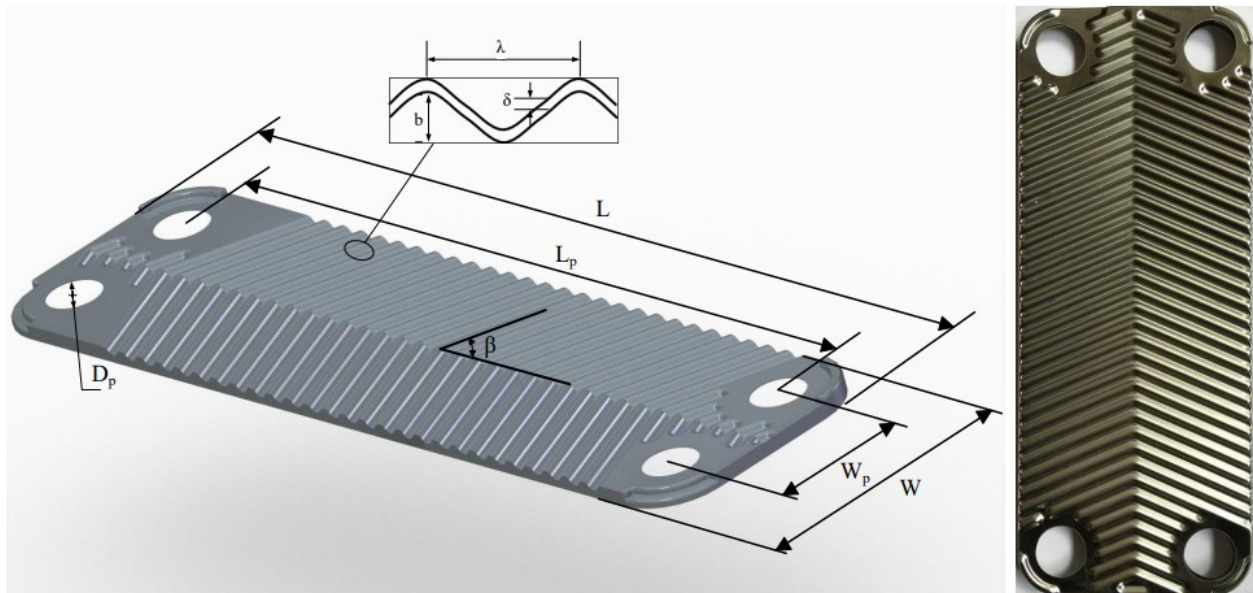


*Slika 3.12. Pločasti izmjenjivač topline [12]*

Izmjena topline provodi se na način da dva medija, topli i hladni, suprotnim strujanjem prolaze paketom ploča prilikom kojeg toplina prelazi s toplijeg medija na hladnije. Brtve između ploča onemogućavaju miješanje dvaju medija. Intenzitet izmjene topline, ali i pada tlaka pri strujanju

fluida između ploča jako ovisi o geometriji žljebova na pločama i kutu njihova nagiba. Kutevi žljebova iznose od  $25^\circ$  do  $70^\circ$ . [5]

Brojnim istraživanjima, kako eksperimentalnim tako i numeričkim, proučava se geometrijske parametre u svrhu optimizacije izmjene topline prema zahtjevima praktičnih primjena. Općenito, rezultati ovih istraživanja pokazuju da geometrijski parametri značajno utječu na izmjenu topline te se fokus optimizacije provodi upravo na geometriji ploča sa žljebovima. Na slici 3.13. nalazi se prikaz metalne ploče izmjenjivača.



Slika 3.13. Geometrijski parametri ploče izmjenjivača [13]

Dugi niz godina su se tradicionalno koristili cijevni, tzv. *shell-and-tube* izmjenjivači, no razvojem tehnologije pločastih izmjenjivača potpuno ih zamjenjuju. Pločasti izmjenjivači topline imaju mnogo veću iskoristivost, značajno manjih su dimenzija, lakši za održavanje i jeftiniji od cijevnih izmjenjivača. Kao nedostatke pločastih izmjenjivača za napomenuti je nešto veći pad tlaka u usporedbi s cijevnim izmjenjivačima te nisu pogodni kod veoma visokih temperatura zbog materijala brtvi.

## 4. TEHNIČKI OPIS CENTRALNOG RASHLADNOG SUSTAVA NA BRODU ZA PRIJEVOZ KEMIKALIJA

U ovom poglavlju prikazane su opće karakteristike broda prijevoz kemikalija i tehnički opis broskog centralnog rashladnog sustava.

### 4.1. Opće karakteristike broda

Brod je opremljen jednim broskim vijkom koji je pogonjen jednim dizelskim motorom. Brod posjeduje jednu neprekinutu palubu, kratko pramčano nadgrađe, bulb pramac, nakošenu krmu i krmeno zrcalo. Strojarnica i nastamba nalaze se na stražnjem dijelu broda. U tablici 4.1. prikazane su tehničke karakteristike broda. [14]

*Tablica 4.1. Tehničke karakteristike broda*

Duljina preko svega	182,90 m
Duljina između okomica	174,80 m
Maksimalna širina	32,20 m
Visina trupa	17,50 m
Gaz	11,20 m
Nosivost	41370 t
Snaga glavnog motora	7020 kW / 85 min <sup>-1</sup>
Brzina na probnoj vožnji	14,5 čv

Brod je podijeljen s 13 nepropusnih poprečnih pregrada koji čine sljedeće glavne odjeljke:

- Pramčani pik
- Tankovi tereta (9x2) (kapaciteta manjeg od 3000 m<sup>3</sup>)
- Taložni tankovi (2), s jednim tankom otpadne tekućine
- Skladišni tankovi broskog teškog goriva (HFO)
- Strojarnica
- Krmeni pik

Tankovi tereta izvedeni su kao dvostjene konstrukcije. Sustav iskrcaja tereta je kapaciteta 3600 m<sup>3</sup>/h a sastoji se od 21 električki pogonjene pumpe instalirane u svakom tanku tereta, taložnom tanku i rezidualnom tanku na sljedeći način:

- 18 pumpi tereta kapaciteta 500 m<sup>3</sup>/h
- 2 pumpe taložnih tankova kapaciteta 300 m<sup>3</sup>/h
- 1 pumpa za tank otpadne tekućine kapaciteta 100 m<sup>3</sup>/h

Brod posjeduje mogućnost smještaja za 28 članova posade, te jednu rezervnu kabinu.

Za proizvodnju električne energije koriste se 3 dizel generatora MAN B&W 7L23/30H snage oko 1,455 kVA svaki, te jedan dizel generator u slučaju nužde, snage 200 kVA. Sustav napajanja je na 440 V/60 Hz i 220 V/60 Hz. [14]

#### **4.1. Centralni rashladni sustav broda**

Za hlađenje glavnog motora, pomoćnih motora i ostalih uređaja kojima je potrebno odvoditi toplinu koristi se centralni rashladni sustav, koji se sastoji od kruga slatke vode i kruga morske vode.

Centralni rashladni sustav broda projektiran je za rad u tropskim uvjetima, odnosno za temperaturu mora od 32 °C i temperaturu okoline od 45 °C. Toplinska bilanca centralnog rashladnog sustava temelji se na režimu pri 100 % opterećenja glavnog pogonskog motora i 70 % opterećenja dva pomoćna motora. Referentna temperatura u toplinskoj bilanci za niskotemperaturni krug slatke rashladne vode je 36 °C.

##### **2.1.1. Sustav morske vode**

Pumpe morske vode usisavaju morsku vodu kroz usisne košare. Na usisu postavljeni su adekvatne rešetke i filtri kao i antivegetativni sustav za sprječavanje rasta morskih organizama. Kako bi se izbjeglo usisavanje zraka u pumpe za morsku vodu, usisne košare opremljene su priključkom za odzračivanje. U tablici 4.2. prikazan je popis pumpi i njihove specifikacije.

Tablica 4.2. Pumpe u krugu morske vode [14]

Pumpa	Količina	Vrsta	Kapacitet [m <sup>3</sup> /h]	Tlak [bar]
Glavna pumpa morske vode	3	Centrifugalna	Prema bilanci topline	2,5
Pumpa morske vode generatora slatke vode	1	Centrifugalna	Prema preporukama proizvođača	

Sustav morske vode sastoji se od tri centrifugalne pumpe namijenjene za hlađenje slatke rashladne vode, te jedna centrifugalna pumpa namijenjena za generator slatke vode. Pumpe za hlađenje slatke vode rade na 50% kapaciteta (ovisno o potrebi hlađenja), dok jedna od njih je u pripravi (stand-by). Pumpi u stanju pripravnosti mora biti osiguran automatski start u bilo kojem trenutku. Jedna od glavnih pumpi povezana je na sigurnosni usis sustava kaljuže. Glavne pumpe morske vode izvedene su kao vertikalne centrifugalne pumpe, a pogoni ih elektromotor. Kućište, rotor i ostali dijelovi koji su u kontaktu s morskom vodom izrađeni su od nikal-aluminij bronce, a vratilo od nehrđajućeg čelika.

#### 2.1.2. Sustav slatke vode

Centralni rashladni sustav broda za prijevoz kemikalija u krugu slatke vode dijeli se na niskotemperaturni krug i visokotemperaturni krug. Temperatura rashladne vode za glavni motor kao i za pomoćne motore kontrolira se pomoću troputnog termostatskog ventila. [14]

#### NISKOTEMPERATURNI KRUG RASHLADE

Niskotemperaturni krug rashlade namijenjen je hlađenju rashladnika glavnog motora, rashladniku pomoćnih motora i hlađenju ostalih pomoćnih strojeva i uređaja. U njemu se nalaze sljedeći elementi:

- tri glavne pumpe niskotemperaturne slatke vode, svaka s 50 % ukupnog kapaciteta
- dvostruki centralni rashladnik
- jedan ekspanzijski tank kapaciteta 1 m<sup>3</sup>

Dvije glavne pumpe služe za cirkulaciju slatke rashladne vode u zatvorenom rashladnom sustavu, dok treća pumpa se nalazi u se treća pumpa nalazi u stanju pripravnosti uz mogućnost automatskog uključanja.

U niskotemperaturnom krugu rashladna voda cirkulira do sljedećih strojeva/uređaja:

- dvostruki centralni niskotemperaturni rashladnik
- rashladnik ulja za podmazivanje glavnog motora
- rashladnik namijenjen hlađenju visokotemperaturne rashladne vode glavnog motora
- zajednički rashladnik pomoćnih motora
- ležaj vratila, kompresor zraka za upućivanje motora, tank za promatranje i mlaki zdenac, kondenzator klima uređaja u kontrolnoj sobi strojarnice, jedinica klima uređaja, sustav rashlade za spremište namirnica i hladnjak zraka za ispiranje

### VISOKOTEMPERATURNI KRUG RASHLADE

Visokotemperaturni krug rashlade namijenjen je za hlađenje glavnog motora i to cilindarskih košuljica, glava cilindra i ispušnih ventila. U takvom cirkulacijskom krugu nalaze se sljedeći elementi:

- dva visokotemperaturna rashladnika (pločasti izmjenjivači)
- dvije pumpe za hlađenje cilindra glavnog motora
- jedan troputni termostatski ventil
- ekspanzijski tank kapaciteta 1,5 m<sup>3</sup>

Jedna cirkulacijska pumpa omogućuje cirkulaciju rashladne vode za hlađenje cilindra, dok je druga pumpa u stanju pripravnosti uz mogućnost automatskog starta pumpe. Kada se brod nalazi u luci, koriste se parni grijači za održavanje temperature u visokotemperaturnom krugu.

Ekspanzijski tank postavljen je na određenoj visini iznad glavnog motora i dopunjava se iz sustava slatke vode na brodu. Tank je izrađen od čelika i opremljen odgovarajućim ventilima.

U tablici 4.3. dan je popis pumpi koje se nalaze u sustavu slatke rashladne vode.

Tablica 4.3. Pumpe u krugu slatke vode [14]

Pumpe	Količina	Vrsta	Kapacitet [m <sup>3</sup> /h]	Tlak [bar]
Glavna pumpa slatke rashladne vode niske temperature	3	Centrifugalna, vertikalna, nesamousisna	Prema bilanci topline	2,5
Glavna pumpa slatke rashladne vode visoke temperature glavnog motora	2	Centrifugalna, vertikalna, nesamousisna	Prema proizvođaču glavnog motora	3
Glavna pumpa slatke rashladne vode visoke temperature pomoćnih motora (ugrađena)	3	Centrifugalna	Prema proizvođaču sporednih motora	1-2.5

#### IZMJENJIVAČI TOPLINE

U tablici 4.4. prikazane su karakteristike izmjenjivača topline koji se koriste u rashladnom sustavu.

Tablica 4.4. Izmjenjivači topline

Izmjenjivač topline	Količina	Vrsta	Morska voda, kapacitet [m <sup>3</sup> /h]	Slatka voda, kapacitet [m <sup>3</sup> /h]	Materijal
Rashladnik slatke vode niske temperature	2	Pločasti	Svaki rashladnik ima 60% ukupnog kapaciteta prema bilanci topline		Ploče od titana
Rashladnik slatke vode visoke temperature	2	Pločasti	Prema zahtjevima proizvođača		Nehrđajući čelik

Rashladnici slatke rashladne vode projektirani su s rezervom od 15% zbog obraštanja. Rashladnici su na ulazu i izlazu opremljeni termometrom te zapornim i odzračnim ventilima. Ekspanzijski tank

postavljen je na određenoj visini iznad glavnog motora i dopunjava se iz sustava slatke vode na brodu.

#### 4.2. Karakteristike glavnog motora

Propulziju broda omogućuje glavni pogonski dvotaktni sporohodni dizelski motor MAN B&W tip 6G50ME-B9.3 izrađen kod proizvođača "ULJANIK STROJOGRAĐNJA" pod licencom MAN-B&W Diesel A/S. Motor razvija snagu od 7020 kW pri 85 min<sup>-1</sup>.

U tablici 4.5. prikazane su osnovne karakteristike motora, dok je na slici 4.1 prikazan je presjek motora.

Tablica 4.5. Karakteristike glavnog motora [14]

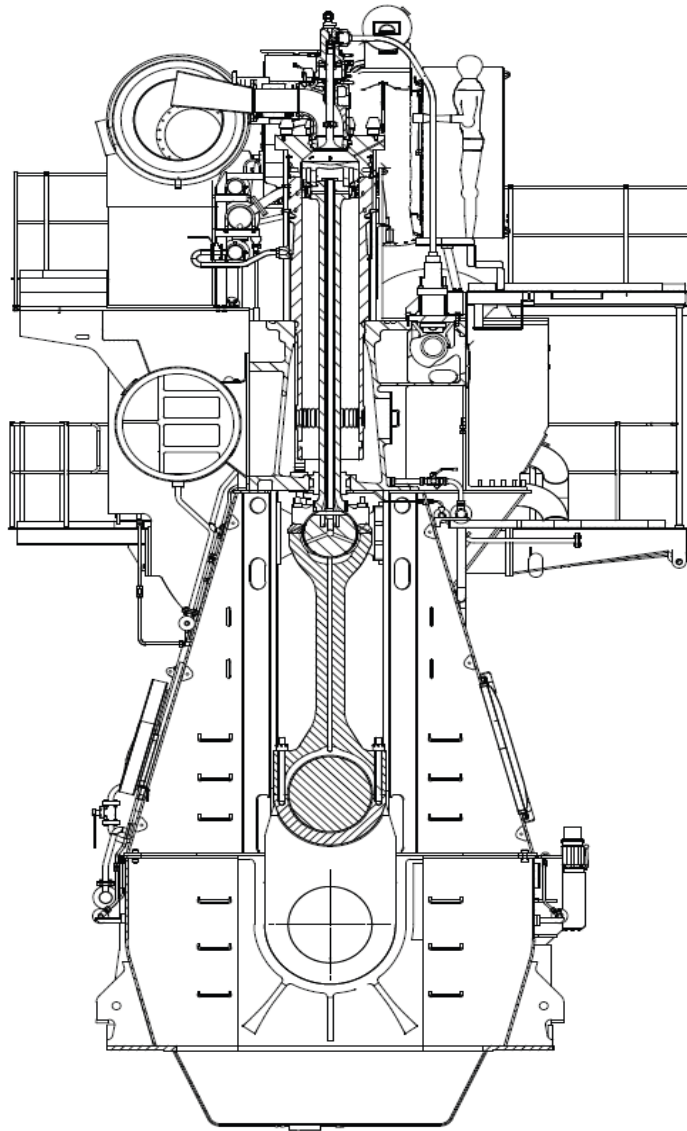
Vrsta	6G50ME-B9.3-Tier II
NMCR („L1“)	10320 kW pri 100 okr/min
Optimiziran MCR („O“)	7020 kW pri 85 okr/min
Operativna snaga	5756 kW (82% MCR) pri 79,6 okr/min
Broj cilindara	6
Stapaj	2500 mm
Masa	Oko 260 t
Gorivo	HFO viskoznosti 380 cSt/50 °C

NMCR L1 – eng. *Nominal maximum continuous rating*, nominalna maksimalna trajna snaga motora

Optimiziran MCR „O“ - Točka u kojoj je motor optimiziran za najmanju specifičnu potrošnju

HFO – eng. *Heavy fuel oil*, teško brodsko gorivo





*Slika 4.1. Presjek glavnog motora 6G50ME*

#### **4.2. Bilanca topline**

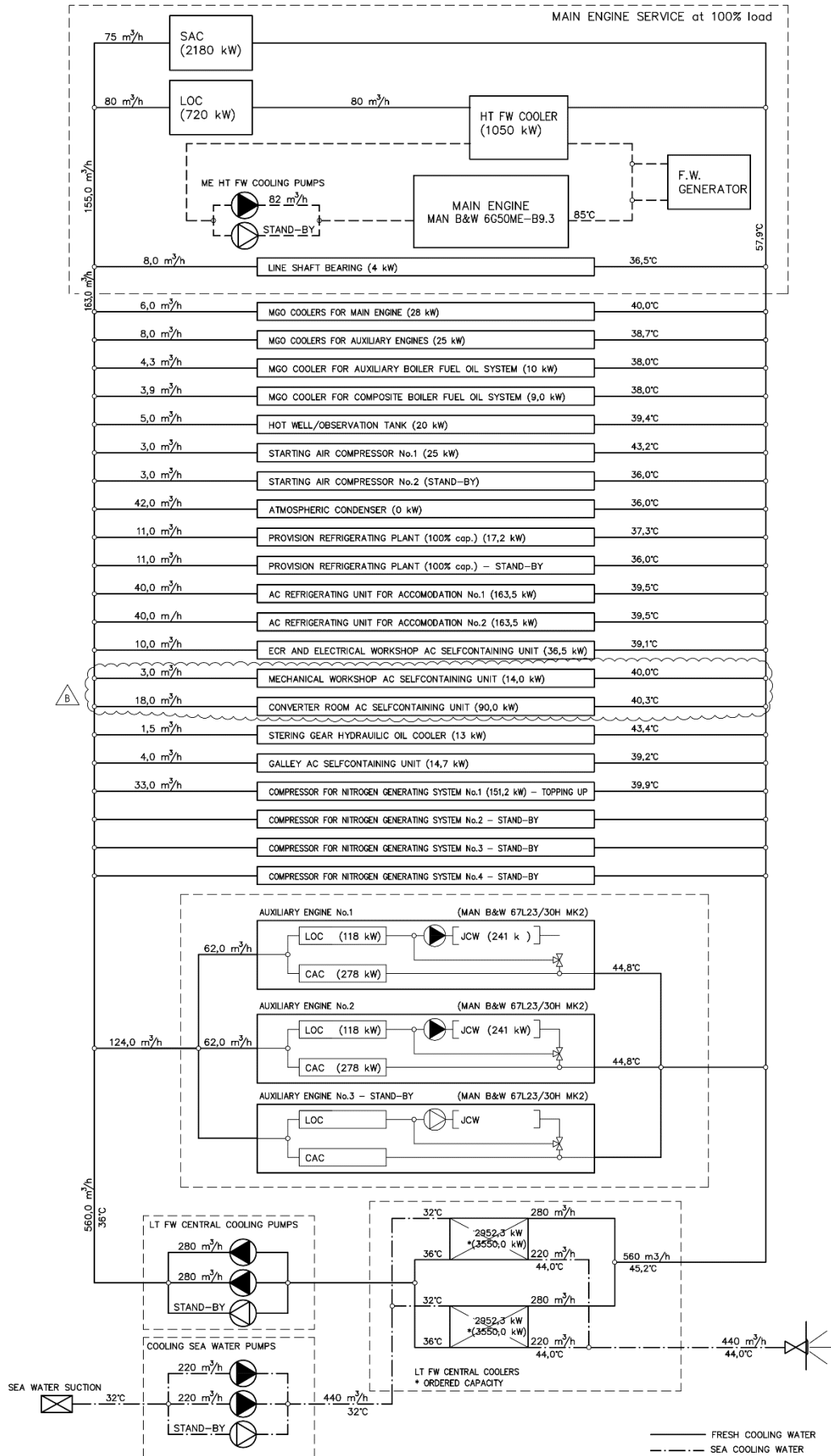
Bilanca topline jest proračun rashladnog sustava, koji se provodi pri određenom režimu navigacije broda kako bi se došlo do podataka o količini otpadne topline pojedinih strojeva i uređaja i na temelju tih podataka određuje se potrebnu količinu rashladne vode u svrhu odvođenja viška topline.

U ovom slučaju se kao mjerodavan režim plovidbe uzima navigacija pri 100 % opterećenja glavnog motora, uz čišćenje/grijanje tankova te dva pomoćna motora pri 70 %. Podatci o toplinskoj bilanci prikazani su u tablici 4.6, dok je kompletna shema s potrošačima topline centralnog sustava prikazana je na slici 4.2.

Tablica 4.6. Bilanca topline s potrošačima

<b>Režim plovidbe: Navigacija sa čišćenjem/grijanjem tankova (glavni motor + 2x pomoćni motor)</b>				
<i>Potrošač</i>	Kol.	Opterećenje [%]	Protok [m <sup>3</sup> /h]	Otpadna toplina [kW]
<i>Glavni motor</i>	1	100	163,0	3954,0
<i>Pomoćni motor</i>	2	70	124,0	1274,0
<i>Rashladnik goriva za glavni motor</i>	1	100	6,0	28,0
<i>Rashladnik goriva za pomoćni motor</i>	1	100	8,0	25,0
<i>Rashladnik goriva pomoćnog kotla</i>	1	100	4,3	10,0
<i>Rashladnik goriva kombiniranog kotla</i>	1	100	3,9	9,0
<i>Mlaki zdenac / tank za promatranje</i>	1	100	5,0	20,0
<i>Kompresor zraka za upućivanje</i>	1	100	3,0	25,0
<i>Atmosferski kondenzator</i>	1	0	42,0	0
<i>Sustav rashlade za održavanje namirnica</i>	1	100	22,0	17,2
<i>Klima uređaj za posadu</i>	2	83,3	80,0	327,0
<i>Klima uređaj za kontrolnu sobu strojarnice i električarsku radionu</i>	1	100	10,0	36,5
<i>Klima uređaj mehaničarske radione</i>	1	100	3,0	14,0
<i>Klima uređaj prostorije konvertera</i>	1	100	18,0	90,0
<i>Rashladnik ulja hidraulike kormilarskog stroja</i>	1	100	1,5	13,0
<i>Klima uređaj kuhinje</i>	1	100	4,0	14,7
<i>Kompresor sustava za proizvodnju dušika</i>	1	40	33,0	151,2
<b>UKUPNO</b>			<b>533,7</b>	<b>6008,6</b>

OPERATING CONDITION: NAVIGATION WITH TANK CLEANING/HEATING



Slika 4.2. Shema bilance topline sa svim potrošačima

## 5. PRORAČUN CENTRALNOG RASHLADNOG SUSTAVA NA TEMELJU TOPLINSKE BILANCE

U ovom poglavlju proveden je proračun cjevovoda centralnog rashladnog sustava broda za prijevoz kemikalija. Cjevovod rashladnog sustava za krug morske vode, krug niskotemperaturne slatke vode i visokotemperaturne slatke vode dimenzioniran je prema prethodno prikazanoj bilanci topline.

Nakon provedenog proračuna cjevovoda, provest će se proračun protoka i padova tlaka kroz cijevi koristeći računalni program FluidFlow koji omogućuje proračun i modeliranje rada rashladnog sustava. Zaključno će se rezultati simulacija analizirati i usporediti sa stvarnom izvedbom rashladnog sustava.

### 5.1. Proračun promjera dionica

Kako bi adekvatno odabrali odgovarajući promjer cijevi za kompletan rashladni sustav, potrebno je poznavati veličinu protoka rashladnog medija i pretpostaviti brzinu strujanja rashladnog medija. Ukupnu količinu protoka očitati će se iz toplinske bilance, dok će se brzina strujanja pretpostaviti u rasponu od 1 - 3 m/s, što predstavlja uobičajenu granicu brzine strujanja slatke rashladne vode. Brzina rashladnog medija ne smije biti prevelika kako bi se spriječila pojava nepoželjnih turbulencija, buke i erozije unutar cijevi, ali niti premala, kako bi se spriječilo taloženje čestica. Za cijev morske vode poželjna je minimalna brzina od 1 m/s da se spriječi obrastanje površine morskim organizmima. [3]

U tablici 5.1. prikazane su veličine protoka za pojedini rashladni krug iščitani iz bilance topline te pretpostavljene brzine rashladnog medija.

*Tablica 5.1. Ukupne količine protoka rashladnih krugova uz pretpostavljene brzine*

	Krug morske vode	Krug slatke vode niske temperature	Krug slatke vode visoke temperature
Ukupni protok, $V$ [m <sup>3</sup> /h]	440	560	82
Pretpostavljena brzina strujanja, $c$ [m/s]	2,3	2,8	2,8

### 5.1.1. Proračun cjevovoda morske vode

Za odabir promjera cijevi koristit će se standard DIN 2448 [15]. Nakon provedenog proračuna po sekcijama prikazat će se u tablici sve odabrane cijevi i karakteristike. Prema općenitom izrazu (5.1.) izračunavat će se odgovarajući promjer cijevi u svim rashladnim krugovima:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} \text{ m} \quad (5.1)$$

gdje je:

$V$  – protok morske vode, m<sup>3</sup>/h

$c$  – pretpostavljena brzina fluida, m/s

Iz toga slijedi da promjer cjevovoda morske vode iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 440}{3600 * 2,3 * 3,14}} = 0,26011 \text{ m} = 260,11 \text{ mm} \quad (5.2)$$

Cijevi na usisu pumpi ponekad su za jedan standardni promjer veće od cijevi na tlačnoj strani, s razlogom da se na taj način smanji brzina strujanja a ujedno i mogućnost pojave kavitacije na usisu pumpi.

U skladu s time, prema standardu DIN 2448 na usisnoj strani odabire se čelična bešavna cijev DN 300 (323,9x7,1).

Stvarna brzina tekućine u cjevovodu računa se pomoću izraza (5.3.):

$$V = A * c_0 = \frac{d_u^2 * \pi}{4} * c_0 \quad (5.3)$$

gdje je:

$V$  – protok morske vode, m<sup>3</sup>/h

$A$  – površina svijetlog presjeka cijevi, m<sup>2</sup>

$c_0$  – stvarna brzina strujanja fluida m/s

Stvarna brzina iznosit će (5.4):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 440}{3600 * 0,3097^2 * \pi} = 1,62 \text{ m/s} \quad (5.4)$$

Na tlačnoj strani prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 250 (273x6.3).

Stvarna brzina na tlačnoj strani iznosi (5.5):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 440}{3600 * 0,2604^2 * \pi} = 2,29 \text{ m/s} \quad (5.5)$$

Radi preglednosti, svi podaci o odabranim cijevima prikazani su u tablici 5.2.

*Tablica 5.2. Karakteristike odabranih cijevi*

<b>Cijev</b>	<b><math>d_v</math> [mm]</b>	<b><math>s</math> [mm]</b>	<b><math>d_u</math> [mm]</b>	<b>Brzina strujanja [m/s]</b>	<b>Pozicija</b>
<b>DN 300</b>	323,9	7,1	309,7	1,62	Usis (prije pumpi)
<b>DN 250</b>	273	6,3	260,4	2,32	Tlačna strana (nakon pumpi)

#### 5.1.2. Proračun cjevovoda slatke vode niske temperature

Krug rashladne slatke vode niske temperature složeniji je u odnosu na krug morske vode radi većeg broja strojeva i uređaja koji se u njemu nalaze. Svaki od tih strojeva i uređaja ima svoj cjevovod s određenim protokom, pa zbog preglednosti dan je odvojen prikaz u tablici 5.3. Svi podaci uzeti su iz bilance topline.

Tablica 5.3. Popis strojeva i uređaja i njihovih protoka u krugu niske temperature

Stroj / uređaj	Količina	Protok, m <sup>3</sup> /h
Ležaj osovinskog voda	1	8
Rashladnik zraka za ispiranje	1	75
Rashladnik ulja za podmazivanje glavnog motora	1	80
Pomoćni motor	2	124
Rashladnik goriva za glavni motor	1	6
Rashladnik goriva za pomoćni motor	1	8
Rashladnik goriva kombiniranog kotla	1	4,3
Rashladnik composite boiler fuel oil	1	3,9
Mlaki zdenac / tank za promatranje	1	5
Kompresor zraka za upućivanje	1	3
Atmosferski kondenzator	1	42
Hladnjača za namirnice	1	22
Klima uređaj za posadu	2	80
Klima uređaj za kontrolnu sobu strojarnice i električarsku radionu	1	10
Klima uređaj mehaničarske radione	1	3
Klima uređaj prostorije konvertera	1	18
Rashladnik hidrauličkog ulja kormilarskog stroja	1	1,5
Klima uređaj kuhinje	1	4
Kompresor sustava za proizvodnju dušika	1	33

Prema izrazu (5.6) dobiva se glavni promjer cjevovoda rashlade u niskotemperaturnom krugu:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 560}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,26596 \text{ m} = 265,96 \text{ mm} \quad (5.6)$$

Prema standardu DIN 2448 odabiru se čelične bešavne cijevi DN 350 (355.6x25) za usisni dio cjevovoda (od rashladnika do pumpi) te DN 300 (323.9x12.5) za tlačni dio (od pumpi prema strojevima i uređajima).

Slijedi stvarna brzina strujanja za usisni dio (5.7):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 560}{3600 * 0,3056^2 * \pi} = 2,12 \text{ m/s} \quad (5.7)$$

Dok za tlačni dio stvarna brzina na tlačnoj strani iznosi (5.8):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 560}{3600 * 0,2989^2 * \pi} = 2,21 \text{ m/s} \quad (5.8)$$

Nakon što je određen promjer glavnog cjevovoda, računa se promjer cijevi pojedinih strojeva i uređaja:

Prema izrazu (5.9) računa se promjer cijevi hladnjaka ulja za podmazivanje:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 80}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,10052 \text{ m} = 100,52 \text{ mm} \quad (5.9)$$



Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 125 (139.7x12,5). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.10):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 80}{3600 * 0,1147^2 * \pi} = 2,15 \text{ m/s} \quad (5.10)$$

Prema izrazu (5.11) računa se promjer cijevi hladnjaka zraka za ispiranje glavnog motora:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 75}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,09733 \text{ m} = 97,33 \text{ mm} \quad (5.11)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 100 (127x6,3). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.12):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 75}{3600 * 0,1144^2 * 3,14} = 2,02 \text{ m/s} \quad (5.12)$$

Prema izrazu (5.13) računa se promjer cijevi hladnjaka ležaja osovinskog voda:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 8}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,03179 \text{ m} = 31,79 \text{ mm} \quad (5.13)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 32 (42.4x2.9). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.14):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 8}{3600 * 0,0362^2 * \pi} = 2,16 \text{ m/s} \quad (5.14)$$

Promjer glavne cijevi rashladne slatke vode prema pomoćnim motorima (5.15) iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 124}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,12514 \text{ m} = 125,15 \text{ mm} \quad (5.15)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 125 (139.7x4). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.16):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 124}{3600 * 0,1317^2 * 3,14} = 2,52 \text{ m/s} \quad (5.16)$$

Promjer cijevi rashladne slatke vode nakon račvanja za pomoćne motore prema (5.17) iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 62}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,08850 \text{ m} = 88,5 \text{ mm} \quad (5.17)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 80 (101.6x4). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.18):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 62}{3600 * 0,0885^2 * 3,14} = 2,5 \text{ m/s} \quad (5.18)$$

Promjer cijevi rashladne slatke vode rashladnika goriva za glavni motor (5.19) iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 6}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,02753 \text{ m} = 27,53 \text{ mm} \quad (5.19)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 25 (33.7x2.3). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.20):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 6}{3600 * 0,0291^2 * 3,14} = 2,5 \text{ m/s} \quad (5.20)$$

Promjer cijevi rashladne slatke rashladnika goriva za pomoćni motor (5.21) iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 8}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,03179 \text{ m} = 31,79 \text{ mm} \quad (5.21)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 32 (42.4x2.9). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.22):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 8}{3600 * 0,0366^2 * \pi} = 2,11 \text{ m/s} \quad (5.22)$$

Promjer cijevi rashladne slatke vode rashladnika goriva pomoćnog kotla (5.23) iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4,3}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,02331 \text{ m} = 23,3 \text{ mm} \quad (5.23)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 20 (30x2.9). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.24):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 8}{3600 * 0,0366^2 * 3,14} = 2,6 \text{ m/s} \quad (5.24)$$

Promjer cijevi rashladne slatke vode rashladnika goriva kombiniranog generatora pare (5.25) iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 3,9}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,0222 \text{ m} = 22,2 \text{ mm} \quad (5.25)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 20 (30x3.2). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.26):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 3,9}{3600 * 0,0222^2 * \pi} = 2,48 \text{ m/s} \quad (5.26)$$

Promjer cijevi rashladne slatke vode za mlaki zdenac i tank za promatranje (5.27) iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 5}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,02513 \text{ m} = 25,13 \text{ mm} \quad (5.27)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 20 (31.8x2.3). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.28):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 5}{3600 * 0,02513^2 * 3,14} = 2,39 \text{ m/s} \quad (5.28)$$

Promjer cijevi rashladne slatke vode kompresora zraka za upućivanje (5.29) iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 3}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,01947 \text{ m} = 19,47 \text{ mm} \quad (5.29)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 15 (25x2). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.30):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 3}{3600 * 0,01947^2 * 3,14} = 2,4 \text{ m/s} \quad (5.30)$$

Promjer cijevi rashladne slatke vode atmosferskog kondenzatora (5.31) iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 42}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,07284 \text{ m} = 72,84 \text{ mm} \quad (5.31)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 65 (82.5x3.2). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.32):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 42}{3600 * 0,0761^2 * \pi} = 2,56 \text{ m/s} \quad (5.32)$$

Promjer cijevi rashladne slatke vode hladnjače za namirnice (5.33) iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 11}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,03728 \text{ m} = 37,27 \text{ mm} \quad (5.33)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 32 (44.5x2.6). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.34):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 11}{3600 * 0,0381^2 * \pi} = 2,68 \text{ m/s} \quad (5.34)$$

Promjer cijevi rashladne slatke vode klima uređaja za posadu (5.35) iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 40}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,07108 \text{ m} = 71,08 \text{ mm} \quad (5.35)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 65 (82.5x3.2). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.36):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 40}{3600 * 0,0761^2 * \pi} = 2,44 \text{ m/s} \quad (5.36)$$

Promjer cijevi rashladne slatke vode klima uređaja za kontrolnu sobu strojarnice i električarsku radionu (5.37) iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 10}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,03554 \text{ m} = 35,54 \text{ mm} \quad (5.37)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 32 (44.5x3.6). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.38):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 10}{3600 * 0,0373^2 * 3,14} = 2,54 \text{ m/s} \quad (5.38)$$

Promjer cijevi rashladne slatke vode klima uređaja mehaničarske radione (5.39) iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 3}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,01947 \text{ m} = 19,47 \text{ mm} \quad (5.39)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 15 (25x2). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.40):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 3}{3600 * 0,021^2 * 3,14} = 2,4 \text{ m/s} \quad (5.40)$$

Promjer cijevi rashladne slatke vode klima uređaja prostorije konvertera (5.41) iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 18}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,04768 \text{ m} = 47,68 \text{ mm} \quad (5.41)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 40 (57x3.6). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.42):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 18}{3600 * 0,04768^2 * \pi} = 2,57 \text{ m/s} \quad (5.42)$$

Promjer cijevi rashladne slatke vode rashladnika hidrauličkog ulja kormilarskog stroja (5.43) iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 1,5}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,01376 \text{ m} = 13,76 \text{ mm} \quad (5.43)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 10 (19x2). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.44):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 1,5}{3600 * 0,01376^2 * 3,14} = 2,36 \text{ m/s} \quad (5.44)$$

Promjer cijevi rashladne slatke vode klima uređaja kuhinje (5.45) iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 4}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,02248 \text{ m} = 22,48 \text{ mm} \quad (5.45)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 20 (30x2.3). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.46):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 4}{3600 * 0,0254^2 * 3,14} = 2,19 \text{ m/s} \quad (5.46)$$

Promjer cijevi rashladne slatke vode kompresora sustava za proizvodnju dušika (5.47) iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 33}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,06456 \text{ m} = 64,56 \text{ mm} \quad (5.47)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 50 (73x2.9). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.48):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 33}{3600 * 0,06456^2 * \pi} = 2,58 \text{ m/s} \quad (5.48)$$

### 2.1.3. Proračun cjevovoda slatke vode visoke temperature

U sustavu slatke vode visoke temperature koja služi za hlađenje glavnog motora, ukupni protok iznosi 82 m<sup>3</sup>/h, dok je brzina pretpostavljena u iznosu od 2,8 m/s.

Promjer cijevi rashladne slatke vode visoke temperature (5.49) iznosi:

$$d = \sqrt{\frac{4 * V}{3600 * c * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 82}{3600 * 2,8 * 3,14}} = 0,10177 \text{ m} = 101,77 \text{ mm} \quad (5.49)$$

Prema standardu DIN 2448 odabire se čelična bešavna cijev DN 100 (127x4). Stvarna brzina strujanja slijedi prema (5.50):

$$c_0 = \frac{4 * V}{3600 * d_u^2 * \pi} = \frac{4 * 33}{3600 * 0,119^2 * 3,14} = 2,05 \text{ m/s} \quad (5.50)$$

## 5.2. Proračun protoka i padova tlaka u rashladnom sustavu

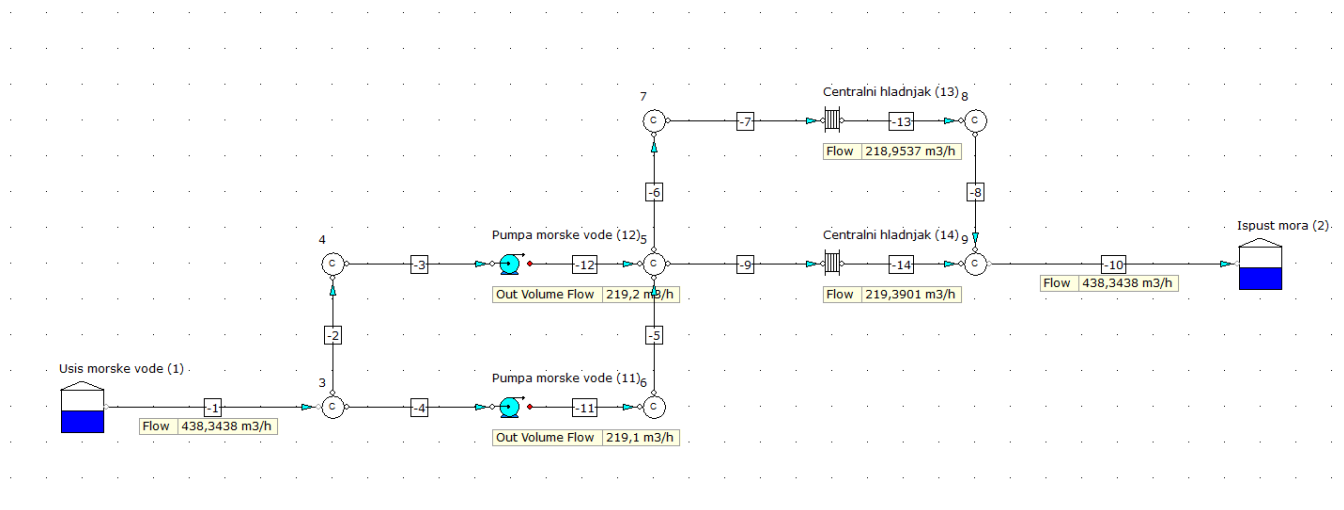
Nakon provedenog proračuna i odabira promjera cijevi rashladnog sustava napravljen je model sustava u računalnom programu FluidFlow. FluidFlow je računalni program koji omogućuje proračun protoka i padova tlaka te određivanje brzina strujanja fluida unutar složenih sustava cjevovoda. [15]

Tijekom izrade modela u računalnom programu, koristili su se promjeri cijevi dobiveni iz proračuna. Cjelokupan sustav radi preglednosti podijeljen je na podsustave: morske vode, slatke vode niske temperature i slatke vode visoke temperature. Model rashladnog sustava izrađen je prema podlogama iz brodogradilišta „Uljanik“.

Izmjenjivači topline također su uključeni u model rashladnog sustava te je na njima pretpostavljen najveći dopušteni pad tlaka od 0,5 bar. U krugu visoke temperature gdje se nalazi glavni motor, pretpostavljen je pad tlaka u iznosu od 1 bar. Podatci o točnoj konfiguraciji cjevovoda i duljina pojedinih cijevi i cijevnih elemenata nisu bili dostupni, pa su oni pretpostavljeni prema dostupnom planu strojarnice i razmještau opreme. Uzevši navedene aproksimacije u obzir, očekuje se da će rezultati provedene simulacije odstupati od predviđenih. Usporedba protoka prikazat će se u tablici na kraju poglavlja.

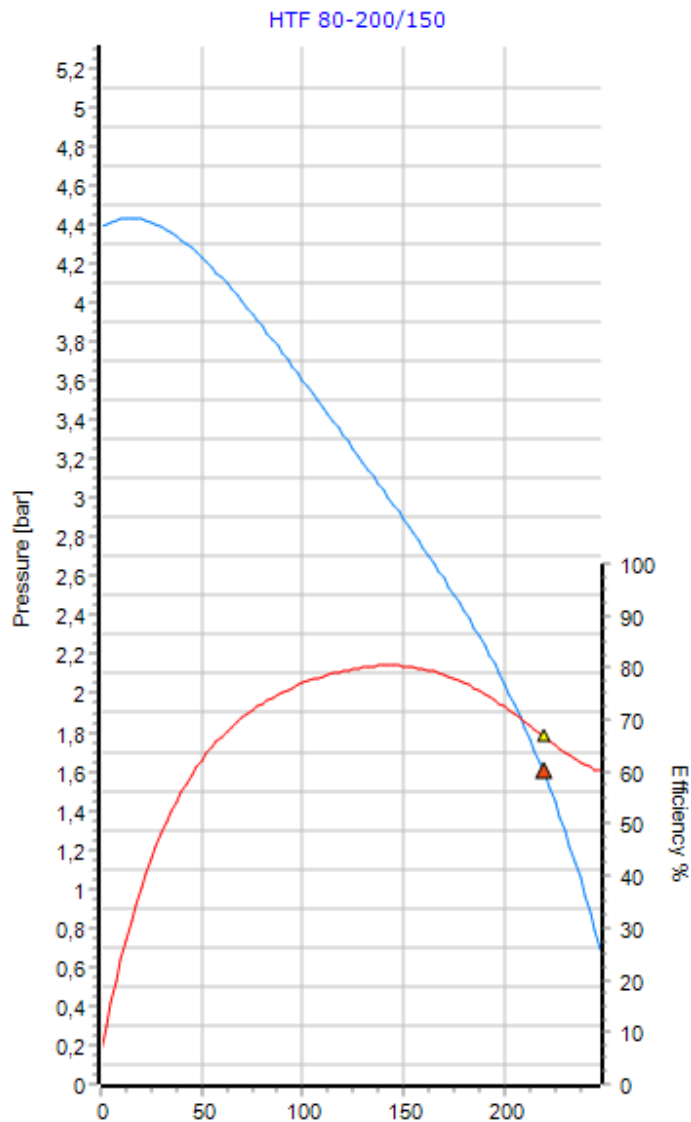
### 5.2.1. Krug morske vode

U krugu morske vode koriste se dvije centrifugalne pumpe Gould HTF 80-200/150 čiji je zadatak ostvariti protok od 438 m<sup>3</sup>/h između usisa morske vode do njenog ispusta u more. Shema kruga morske vode prikazana je na slici 5.1., dok na slici 5.2. prikazan je dijagram karakteristika pumpi s ucrtanom izračunatom radnom točkom za zadanu konfiguraciju cjevovoda.



Slika 5.1. Shema kruga morske vode

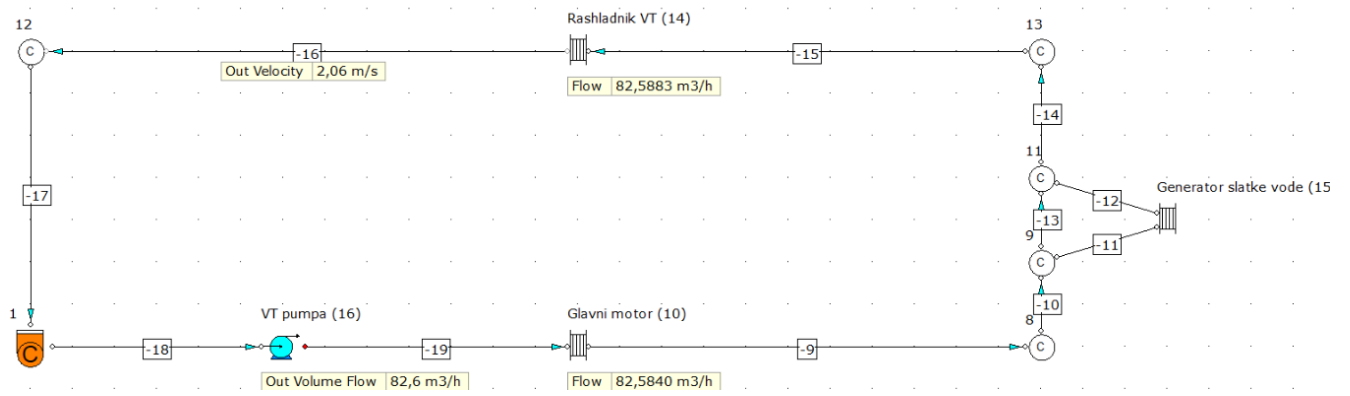




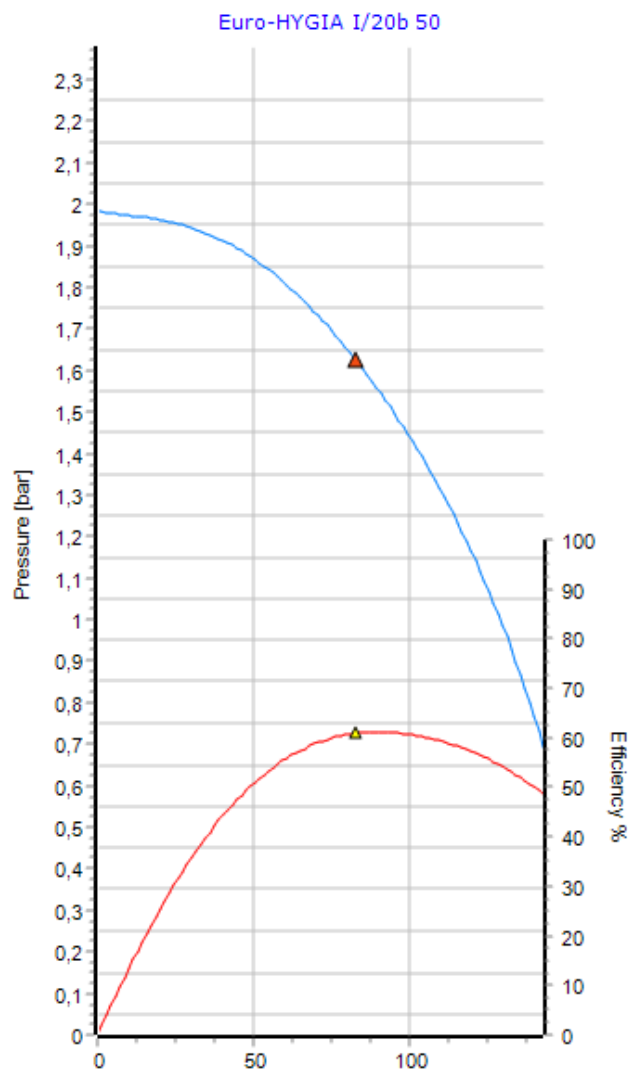
Slika 5.2. Karakteristika pumpi HTF 80-200/150 s ucrtanom radnom točkom

### 5.2.2. Krug slatke vode visoke temperature

Krug slatke vode visoke temperature je zatvoreni cirkulacijski krug koji služi za hlađenje glavnog motora. Za cirkulaciju rashladne vode izabrana je pumpa Hilge Euro-HYGIA I/20b 50 koja bi trebala ostvariti protok od  $83 \text{ m}^3/\text{h}$  za zadanu konfiguraciju cjevovoda. Shema kruga slatke vode visoke temperature prikazana je na slici 5.3., dok na slici 5.4. prikazan je dijagram karakteristika pumpi s ucrtanom izračunatom radnom točkom za zadanu konfiguraciju cjevovoda.



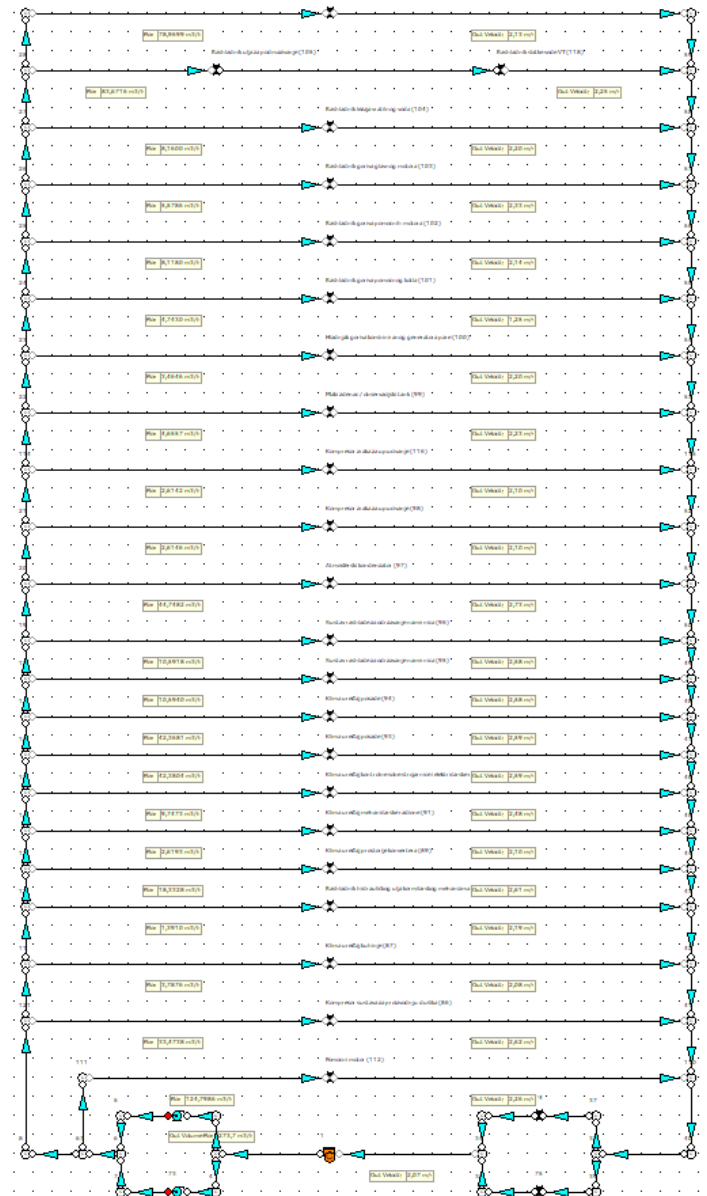
Slika 5.3. Model kruga slatke vode visoke temperature



Slika 5.4. Karakteristika pumpe Hilge Euro-HYGIA I/20b 50 s ucrtanom radnom točkom

### 5.2.3. Krug slatke vode niske temperature

Krug slatke vode niske temperature najkompleksniji je rashladni krug zbog velikog broja elemenata i složenosti cjevovoda. Za cirkulaciju rashladne vode izabrane su dvije pumpe AFP 2024 M185/6-41, proizvođača ABS. Pumpe bi trebale ostvariti protok od približno 550 m<sup>3</sup>/h. Na slici 5.5. prikazan je model cijelog sustava rashladne vode niske temperature, dok detaljniji prikazi sheme prikazani su u slikama 5.6. i 5.7., dok je na slici 5.8. prikazan dijagram karakteristika pumpe s ucrtanom radnom točkom za zadanu konfiguraciju cjevovoda. U tablici 5.1. prikazani su rezultati svih protoka dobivenih simulacijom i njihova usporedba s protocima iz bilance topline.



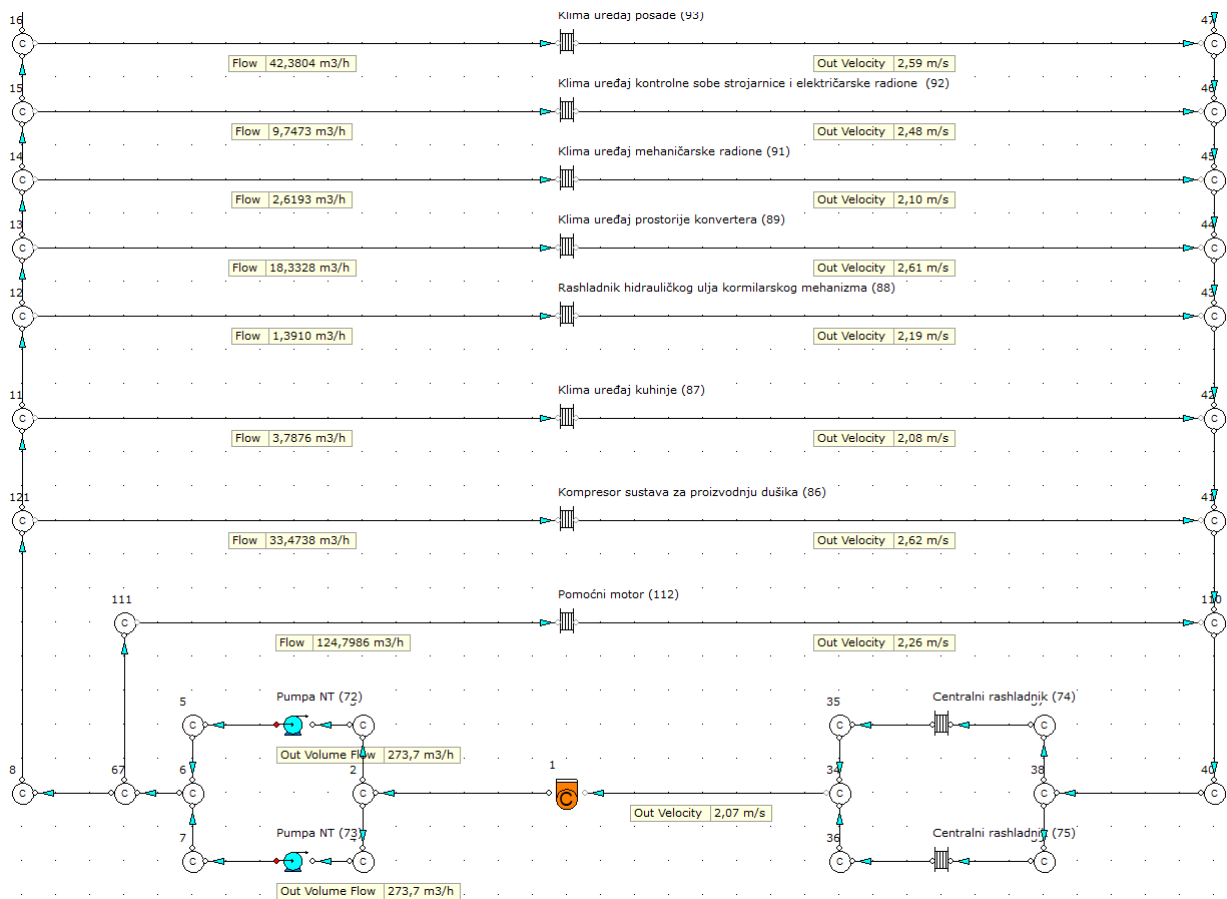
Slika 5.5. Shema kruga slatke vode niske temperature



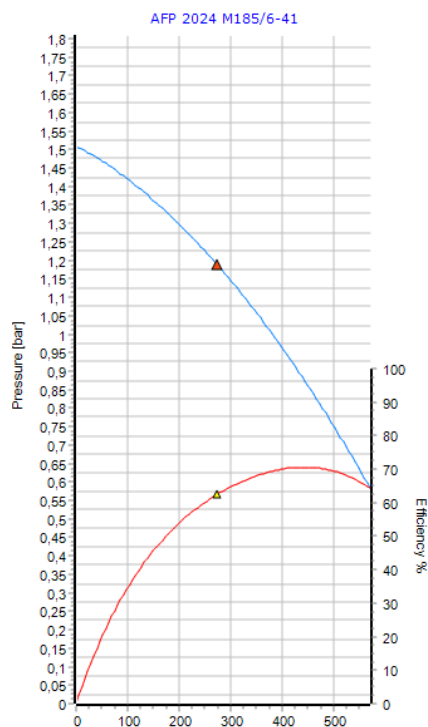
Slika 5.6. Model kruga slatke vode niske temperature, detalj



Slika 5.7. Model kruga slatke vode niske temperature, detalj



Slika 5.8. Model kruga slatke vode niske temperature, detalj



Slika 5.9. Karakteristika pumpe AFP 2024 M185/6-41 s ucrtanom radnom točkom

Tablica 5.4. Dobiveni rezultati protoka

Rashladni krug	Potrošači	Bilanca topline	FluidFlow
		protok [m <sup>3</sup> /h]	protok [m <sup>3</sup> /h]
Morska voda	Centralni hladnjaci	220	219
Slatka voda - VT	Rashladnik VT kruga	82	82,6
	Glavni motor	(80)	82,5
Slatka voda - NT	Rashladnik zraka za ispiranje	75	78,9
	Rashladnik ulja za podmazivanje	80	83,7
	Rashladnik slatke vode VT	80	83,6
	Rashladnik ležaja osovinskog voda	8	8,2
	Rashladnik goriva glavnog motora	6	5,6
	Rashladnik goriva pomoćnih motora	8	8,1
	Rashladnik goriva pomoćnog kotla	4,3	4,7
	Hladnjak goriva kombiniranog generatora pare	3,9	3,5
	Mlaki zdenac / tank za promatranje	5	4,7
	Kompresor zraka za upućivanje (2)	3	2,6
	Atmosferski kondenzator	42	44,7
	Hladnjača za namirnice (2)	11	10,6
	Klima uređaj posade (2)	40	42,4
	Klima uređaj kontrolne sobe strojarnice i električarske radione	10	9,7
	Klima mehaničarske radione	3	2,6
	Klima uređaj prostorije konvertera	18	18,3
	Rashladnik hidrauličkog ulja kormilarskog stroja	1,5	1,4
	Klima uređaj kuhinje	4	3,8
	Kompresor sustava za proizvodnju dušika	33	33,5
	Pomoćni motor	124	124,8
Centralni rashladnik (2)	280	273,7	

## 6. ODABIR OPREME BRODSKOG RASHLADNOG SUSTAVA

Nakon izrade proračuna i simulacije rashladnog sustava odabiru se elementi sustava koji omogućavaju odvođenje otpadne topline i pravilan rad cjelokupnog sustava. Oprema koja se odabere mora omogućiti pravilan rad sustava u slučaju najvećeg opterećenja, te na taj način osigurati neupitnu efikasnost sustava i zaštitu od pregrijavanja.

Odabir pumpi provodi se na temelju dobivenih vrijednosti tlakova i protoka iz simulacije rashladnog sustava. U računalnom programu FluidFlow moguć je direktni odabir pumpi iz baze podataka programa. U tablicama 6.1., 6.2. i 6.3. prikazane su karakteristike odabranih pumpi za pojedine cirkulacijske krugove.

*Tablica 6.1. Karakteristike odabrane pumpe morske vode [16]*

Proizvođač	Gould
Model	HTF 80-200/150
Tip pumpe	Centrifugalna
Tlak	4,5 bar
Kapacitet	220 m <sup>3</sup> /h
Iskoristivost	66,71%
NPSH <sub>potr</sub>	6,24 m
Snaga za pogon pumpe	14,08 kW

*Tablica 6.2. Karakteristike odabrane pumpe slatke vode niske temperature [16]*

Proizvođač	ABS
Model	AFP 2024 M185/6-41
Tip pumpe	Centrifugalna
Tlak	1,5 bar
Kapacitet	280 m <sup>3</sup> /h
Iskoristivost	63,87%
NPSH <sub>potr</sub>	9,8 m
Snaga za pogon pumpe	13,8 kW

Tablica 6.3. Karakteristike odabrane pumpe slatke vode visoke temperature [16]

Proizvođač	Hilge
Model	Euro-HYGIA I/20b 50
Tip pumpe	Centrifugalna
Radni tlak	2 bar
Kapacitet	220 m <sup>3</sup> /h
Iskoristivost	60,7%
NPSH <sub>potr</sub>	3,87 m
Snaga za pogon pumpe	6 kW

Rashladnici se odabiru prema toplinskoj bilanci, kada je sustav najviše opterećen. Odabrani rashladnici moraju omogućiti potrebnu izmjenu topline i na taj način osigurati funkcionalnost rashladnog sustava. Za potrebe opisanog centralnog rashladnog sustava odabiru se rashladnici GEA ECOFLEX NT150L B-6 kao centralni rashladnik kruga niske temperature te GEA ECOFLEX NT100T CDL-10U za krug visoke temperature. U tablicama 6.4. i 6.5. prikazane su karakteristike odabranih rashladnika.

Tablica 6.4. Karakteristike centralnog rashladnika kruga niske temperature [14]

<b>GEA ECOFLEX NT150L B-6</b>	<b>Topla strana</b>	<b>Hladna strana</b>
Radni medij	Slatka voda NT	Morska voda
Volumni protok	280 m <sup>3</sup> /h	220 m <sup>3</sup> /h
Temperatura, ulaz	46,44 °C	32 °C
Temperatura, izlaz	36 °C	45,46 °C
Pad tlaka	0,61 bar	0,53 bar
Volumen medija	0,335 m <sup>3</sup>	0,338 m <sup>3</sup>
Gustoća medija	990,45 kg/m <sup>3</sup>	1018,07 kg/m <sup>3</sup>
Specifični toplinski kapacitet	4166,75 J/kgK	3999,71 J/kgK
Toplinska vodljivost	0,633 W/mK	0,626 W/mK
Površina izmjene topline	231,42 m <sup>2</sup>	231,42 m <sup>2</sup>
Broj ploča izmjenjivača topline	268	268
Izmijenjeni toplinski tok	3350 kW	



Tablica 6.5. Karakteristike rashladnika kruga visoke temperature [14]

<b>GEA ECOFLEX NT100T CDL-10</b>	<b>Topla strana</b>	<b>Hladna strana</b>
Radni medij	Slatka voda VT	Slatka voda NT
Volumni protok	82 m <sup>3</sup> /h	80 m <sup>3</sup> /h
Temperatura, ulaz	85 °C	42 °C
Temperatura, izlaz	73,69 °C	53,48 °C
Pad tlaka	0,2 bar	0,22 bar
Volumen medija	0,0169 m <sup>3</sup>	0,018 m <sup>3</sup>
Gustoća medija	971,52 kg/m <sup>3</sup>	987,73 kg/m <sup>3</sup>
Specifični toplinski kapacitet	4195,91 J/kgK	4167,9 J/kgK
Toplinska vodljivost	0,668 W/mK	0,641 W/mK
Površina izmjene topline	10,80 m <sup>2</sup>	10,80 m <sup>2</sup>
Broj ploča izmjenjivača topline	42	42
Izmijenjeni toplinski tok	1050 kW	

## 7. ZAKLJUČAK

Iz ovog rada moguće je procijeniti značaj rashladnog sustava kao jednog od vitalnih elemenata brodskog pogonskog postrojenja. Izuzetno je važno da kod svih strojeva i uređaja kod kojih se tijekom njihovog rada generira otpadna toplina postoji sustav koji će tu toplinu na adekvatan i siguran način ukloniti, te omogućiti pravilan i pouzdan rad cjelokupnog postrojenja. Pouzdanost rada sustava rashlade s razlogom se pažljivo analizira i optimizira, kako bi plovidba bila sigurna i uspješna, kako za posadu i brodski teret tako i za okoliš.

U ovom radu prikazan je i opisan centralni rashladni sustav, u današnje vrijeme najčešće korišten način rashlade kod većih brodskih pogona. Provedeni su preliminarni proračun i dimenzioniranje pojedinih dionica cjevovoda rashladnog sustava, da bi potom u računalnom programu bio izrađen i ispitan model analiziranog rashladnog sustava. Simulacija u računalnom programu provedena je s ciljem da se precizno odrede karakteristike rashladnog sustava te da se osigura odabir odgovarajuće opreme sustava. Odabirom adekvatne opreme zadovoljene su potrebe sustava i kod najvećih opterećenja te se na taj način osigurava pravilan rad cjelokupnog sustava rashlade.

Zaključno, primjenom specijaliziranog računalnog programa temeljenog na odgovarajućim numeričkim modelima, u ovom je radu prikazan postupak dimenzioniranja i analize rashladnog sustava s ciljem da se osigura njegova funkcionalnost te samim time i sigurnost i ekonomičnost plovidbe. Pravilnim dimenzioniranjem rashladnog sustava otvara se mogućnost za preciznije i kvalitetnije iskorištavanje otpadne topline, čija količina raste proporcionalno sa snagom brodskog pogonskog postrojenja.

## LITERATURA

- [1] Stanivuk, T., Lalić, B., Šundov, M., Žanić Mikuličić J.: "Simulation Modelling of Marine Diesel Engine Cooling System", Split: Transactions on Maritime Science, 2021.
- [2] Mrzljak, V.: Predavanja iz kolegija "Motori", Rijeka, Tehnički fakultet, 2023.
- [3] Martinović, D.: "Brodski strojni sustavi", Rijeka, Pomorski fakultet, 2005.
- [4] Cummins Onan: "Recreational & Light Commercial Marine Aftermarket Support Guide", s interneta, [https://www.seapowermarine.com/seapowerwp/wp-content/uploads/2019/03/1788\\_LRC-Parts-Guide-v18.pdf](https://www.seapowermarine.com/seapowerwp/wp-content/uploads/2019/03/1788_LRC-Parts-Guide-v18.pdf), 12.4.2024
- [5] Mrakovčić, T.: Predavanja iz kolegija "Brodski sustavi", Rijeka, Tehnički fakultet.
- [6] Mrakovčić, T.: "Osnivanje i vođenje broskog pogonskog postrojenja", Rijeka, Tehnički fakultet, 2003.
- [7] Marine Online: "Maintenance and Treatment of Diesel Engine Cooling Water Systems", s interneta, 5.5.2024
- [8] MAN, "MAN Service Letter: SL2014-589/MTS", s interneta, 28.4.2024.
- [9] Ozretić, V.: "Brodski pomoćni strojevi i uređaji", Split, Split Ship management, 1996.
- [10] Kralj, P.: "Priručnik iz brodskih cjevovoda za studijske programe BS, EITP, NTPP te programe cjeloživotnog učenja", Rijeka, Tehnički fakultet, 2014.
- [11] Matulja, T.: Predavanja iz kolegija "Opremanje i remont broda", Rijeka, Tehnički fakultet, 2023.
- [12] Abramović, V. i ostali.: "Tehnička enciklopedija 1963–97.", Zagreb: LZ Miroslav Krleža, 1997.
- [13] Savree: "Plate Heat Exchanger (PHE) Explained", s interneta, <https://savree.com/en/encyclopedia/plate-heat-exchanger-phe>, 15.3.2024.

- [14] Zhang, J., Zhu, X., Mondejar, M. E. Haglind, F.: "A review of heat transfer enhancement techniques in plate heat exchangers", Technical University of Denmark, 2019.
- [15] Tehnički opis broda za prijevoz kemikalija, Pula, Brodogradilište "Uljanik", 2013.
- [16] Dlubal Software: "DIN 2448 Cross-Section Properties & Analysis", s interneta, <https://www.dlubal.com/en/cross-section-properties/series-dn-din-2448>, 24.4.2024.
- [17] FluidFlow Software: Complete Pipe Flow Simulation Software, s interneta, <https://fluidflowinfo.com/spec-sheet/>, 3.5.2024.

## POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

SIMBOL	MJERNA JEDINICA	ZNAČENJE
$A$	$m^2$	površina svijetlog presjeka cijevi
$d$	mm	promjer cijevi
$d_u$	mm	unutarnji promjer cijevi
$d_v$	mm	vanjski promjer cijevi
$V$	$m^3/s$	volumni protok
$c$	m/s	brzina strujanja fluida
$c_0$	m/s	stvarna brzina strujanja fluida
$p$	bar	tlak

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Prosječne temperature stjenki u prostoru izgaranja brodskog 2T dizelskog motora [2].	2
Slika 2.2. Predgrijavanje glavnog motora [3] .....	7
Slika 2.3. Shema konvencionalnog rashladnog sustava [5] .....	8
Slika 2.4. Shema centralnog rashladnog sustava [6] .....	10
Slika 3.1. Centralni rashladni sustav sa spojenom niskotemperaturnom i visokotemperaturnom cirkulacijom [3] .....	13
Slika 3.2. Centralni rashladni sustav s odvojenom niskotemperaturnom i visokotemperaturnom cirkulacijom [3] .....	14
Slika 3.3. Plovidba broda u ovisnosti o temperaturi mora [3] .....	15
Slika 3.4. Centralni rashladni sustav s tri pumpe [3] .....	16
Slika 3.5. Shema usisa morske vode [3] .....	18
Slika 3.6. Filtar sa sitom [9] .....	19
Slika 3.7. Detalj smještaja cjevovoda u strojarnici [11] .....	20
Slika 3.8. Različite vrste zapornih ventila [3] .....	22
Slika 3.9. Troputni termostatski ventil [5] .....	23
Slika 3.10. Termostatski ventil instaliran kao miješajući ventil (a) i kao ventil za razdvajanje struje (b) [5] .....	23
Slika 3.11. Dijelovi centrifugalne pumpe [9] .....	24
Slika 3.12. Pločasti izmjenjivač topline [12] .....	25
Slika 3.13. Geometrijski parametri ploče izmjenjivača [13] .....	26
Slika 4.1. Presjek glavnog motora 6G50ME .....	33
Slika 4.2. Shema bilance topline sa svim potrošačima .....	35
Slika 5.1. Shema kruga morske vode .....	48
Slika 5.2. Karakteristika pumpe HTF 80-200/150 s ucrtanom radnom točkom .....	49
Slika 5.3. Model kruga slatke vode visoke temperature .....	50
Slika 5.4. Karakteristika pumpe Hilge Euro-HYGIA I/20b 50 s ucrtanom radnom točkom .....	50
Slika 5.5. Shema kruga slatke vode niske temperature .....	51
Slika 5.6. Model kruga slatke vode niske temperature, detalj .....	52
Slika 5.7. Model kruga slatke vode niske temperature, detalj .....	52
Slika 5.8. Model kruga slatke vode niske temperature, detalj .....	53
Slika 5.9. Karakteristika pumpe AFP 2024 M185/6-41 s ucrtanom radnom točkom .....	53

## POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Tehničke karakteristike broda .....	27
Tablica 4.2. Pumpe u krugu morske vode [14] .....	29
Tablica 4.3. Pumpe u krugu slatke vode [14].....	31
Tablica 4.4. Izmjenjivači topline.....	31
Tablica 4.5. Karakteristike glavnog motora [14] .....	32
Tablica 4.6. Bilanca topline s potrošačima .....	34
Tablica 5.1. Ukupne količine protoka rashladnih krugova uz pretpostavljene brzine .....	36
Tablica 5.2. Karakteristike odabranih cijevi .....	38
Tablica 5.3. Popis strojeva i uređaja i njihovih protoka u krugu niske temperature .....	39
Tablica 5.4. Dobiveni rezultati protoka.....	54
Tablica 6.1. Karakteristike odabrane pumpe morske vode [16] .....	55
Tablica 6.2. Karakteristike odabrane pumpe slatke vode niske temperature [16] .....	55
Tablica 6.3. Karakteristike odabrane pumpe slatke vode visoke temperature [16] .....	56
Tablica 6.4. Karakteristike centralnog rashladnika kruga niske temperature [14].....	56
Tablica 6.5. Karakteristike rashladnika kruga visoke temperature [14] .....	57

## SAŽETAK

U ovom diplomskom radu opisan je i objašnjen način funkcioniranja rashladnog sustava broda. Opisane su i razmotrene razlike između direktnog i indirektnog sustava hlađenja, s naglaskom na indirektni sustav koji je detaljnije objašnjen i analiziran. Rad se posebno usredotočuje na centralni rashladni sustav, analizirajući sve njegove ključne komponente i način funkcioniranja. U radu je prikazana bilanca topline na primjeru broda za prijevoz kemikalija, izgrađenog u brodogradilištu „Uljanik“. Na temelju tih podataka, izvršen je proračun cjevovoda rashladnog sustava prema kojem su odabrane odgovarajuće dimenzije cijevi. Koristeći računalni program FluidFlow proveden je proračun protoka i padova tlaka u cjevovodu rashladnog sustava broskog pogonskog postrojenja. Nakon provođenja simulacija cirkulacijskih krugova odabrana je adekvatna oprema rashladnog sustava te je prikazana usporedba dobivenih i pretpostavljenih rezultata. Analizom je utvrđeno da podaci dobiveni simulacijama u programu FluidFlow odstupaju od predviđenih rezultata iz toplinske bilance, što je bilo i očekivano, a razlozi tih odstupanja objašnjeni su u završnom dijelu rada.

**Ključne riječi:** centralni rashladni sustav, brod za prijevoz kemikalija, simulacija

## ABSTRACT

This thesis describes and explains how a ship's cooling system works. The differences between direct and indirect cooling systems are described and discussed, with the focus on the indirect system, which is explained and analyzed in more detail. The main focus of the thesis is on the central cooling system, whereby all important components and their mode of operation are analyzed. The thesis presents the heat balance on the example of a chemical tanker built in the shipyard "Uljanik". On the basis of these data, the calculation of the cooling system piping was carried out, according to which the appropriate dimensions of the pipes were selected. A model of the cooling system was created using the FluidFlow program. After simulating the circulation circuits, the appropriate cooling system equipment was selected and a comparison of the obtained and predicted results was presented. The analysis showed that the data obtained by simulations in the FluidFlow program deviated from the predicted results of the heat balance, which was to be expected, and the reasons for these deviations are explained in the final part of the thesis.

**Ključne riječi:** central cooling system, chemical tanker, simulation



## **POPIS PRILOGA**

Shema 1. Shema rashladnog sustava slatke vode

Shema 2. Shema rashladnog sustava morske vode