

# ANALIZA TERMODINAMIČKIH PROCESA U LNG TERMINALU KRK

---

**Kaurić, Rafael**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*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:190:699864>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-29**



*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ANALIZA TERMODINAMIČKIH PROCESA U LNG**  
**TERMINALU KRK**

Rijeka, studeni 2022.

Rafael Kaurić  
0069068208

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ANALIZA TERMODINAMIČKIH PROCESA U LNG  
TERMINALU KRK**

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Paolo Blecich

Rijeka, studeni 2022.

Rafael Kaurić  
0069068208

## **IZJAVA**

Sukladno odredbama Pravilnika o diplomskom radu Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad u razdoblju od 01.07. do 10.11. 2022. godine.

Diplomski rad imena „Analiza termodinamičkih procesa u LNG terminalu Krk“ izradio sam primjenjujući znanje stečeno tokom diplomskog studija te koristeći literaturu navedenu u popisu pod vodstvom mentora Izv. prof. dr. sc. Paola Blecicha.

U Rijeci, studeni 2022.

---

Rafael Kaurić

## **ZAHVALA**

Zahvaljujm se svome mentoru Izv. prof. dr. sc. Paolu Blecichu na pruženim savjetima, znanju i na uloženom vremenu prilikom pisanja ovog rada. Također zahvaljujem se svojim prijateljima i svojoj obitelji na podršci i pripomoći gdje god i kad god je trebalo.

# SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| 1. UVOD .....   | 1  |
| 2. ODOBALNA POSTROJENJA ZA UPLINJAVANJE UKAPLJENOG PRIRODNOG<br>PLINA .....   | 2  |
| 2.1. FSRU postrojenja (plutajuća postrojenja za skladištenje i uplinjavanje prirodnog<br>plina) 3                             |    |
| 2.1.1. Princip rada FSRU postrojenja.....   | 5  |
| 2.1.2. Vrste isparivača kod odobalnih postrojenja za prihvat, skladištenje i<br>uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina ..... | 8  |
| 2.2. Brodovi za prijevoz ukapljenog prirodnog plina.....  | 16 |
| 2.2.1. Vrste sustava za prijevoz ukapljenog prirodnog plin .....  | 17 |
| 2.2.2. Rukovanje teretom prilikom prijevoza ukapljenog prirodnog plina .....  | 21 |
| 3. ODOBALNO POSTROJENJE ZA UPLINJAVANJE UKAPLJENOG PRIRODNOG<br>PLINA – OMIŠALJ .....   | 24 |
| 3.1. FSRU brod .....  | 24 |
| 3.2. Pristan .....  | 27 |
| 3.3. Tehnološki procesi koji se odvijaju na LNG terminalu Krk .....   | 28 |
| 3.3.1. Procjena potrošnje plina ako bi cijeli proces radio samo u zatvorenom krugu..  | 33 |
| 3.4. Procjena utjecaja na okoliš .....  | 34 |
| 4. PRORAČUN TERMODINAMIČKIH PROCESA U LNG TERMINALU KRK .....   | 38 |
| 4.1. Polazne postavke proračuna .....   | 42 |
| 4.2. Proračun pločastog izmjenjivača topline .....  | 44 |
| 4.2.1. Analiza dobivenih rezultata.....   | 61 |
| 4.3. Proračun izmjenjivača topline tipa cijevi u plaštu .....   | 66 |
| 4.3.1. Analiza dobivenih rezultata.....   | 76 |
| 5. ZAKLJUČAK .....  | 80 |
| LITERATURA.....   | 81 |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| POPIS SLIKA .....            | 83 |
| POPIS TABLICA.....           | 84 |
| POPIS OZNAKA I KRATICA ..... | 85 |
| SAŽETAK.....                 | 91 |
| ABSTRACT .....               | 92 |

## 1. UVOD

U ovom radu biti će obrađena odobalna postrojenja za ukapljeni prirodni plin, te će se dotaknuti i općenitog lanca opskrbe tih postrojenja.

U prvom dijelu diplomskog rada obrađene su radne karakteristike odobalnih postrojenja za ukapljeni prirodni plin. Opisuju se različite vrste brodova za prijevoz, skladištenje i uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina, te različite tehnologije uplinjavanja prirodnog plina, te naposljetku i opis odobalnog postrojenja za prihvat, skladištenje i uplinjavanje prirodnog plina na otoku Krku. Opisan je način rada „LNG terminala Krk“, tehnološke varijante i njihove radne karakteristike.

U drugom dijelu diplomskog rada proveden je proračun za termodinamičke procese na „LNG terminalu Krk“. Detaljnije, upoznajemo se sa radnim tvarima i njihovim karakteristikama, na koji način sudjeluju u procesu uplinjavanja prirodnog plina, te je prikazan i izračun pločastog izmjenjivača topline i izmjenjivača topline tipa cijevi u plaštu u kojima se radne tvari koriste. Također, izvršena je i analiza rezultata za pločasti izmjenjivač topline.

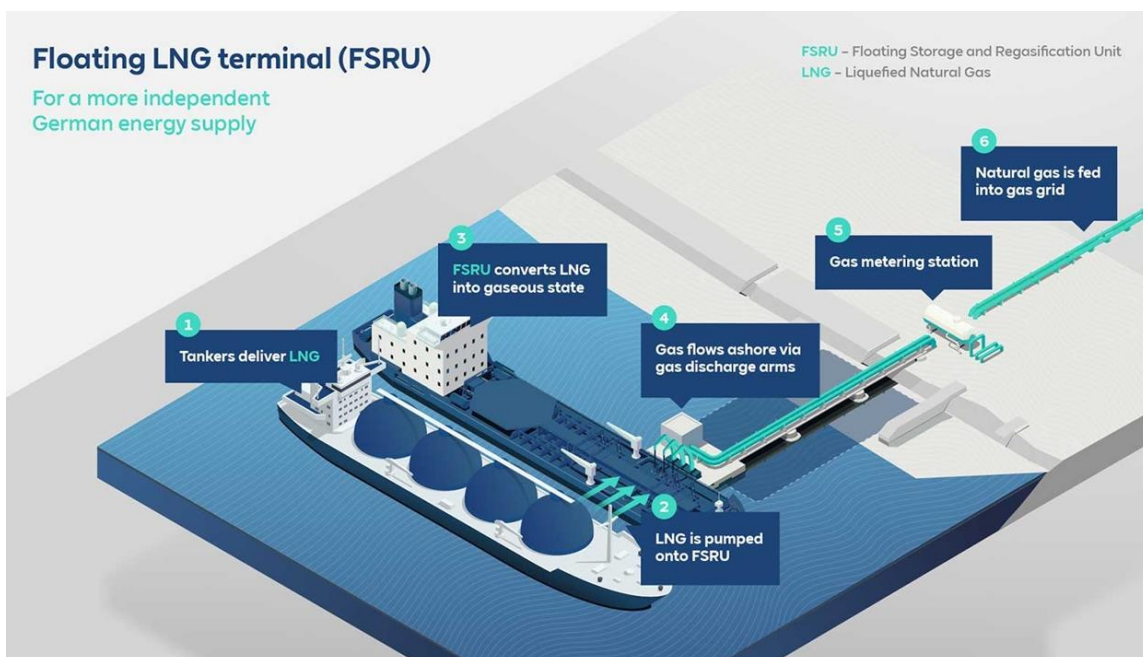


## 2. ODOBALNA POSTROJENJA ZA UPLINJAVANJE UKAPLJENOG PRIRODNOG PLINA

Odobalna postrojenja za uplinjavanje ukapljenoga prirodnog plina konstrukcijski je moguće izvesti na tri različita načina [1]:

- FSRU (eng. Floating Storage and Regasification Unit) terminal, postrojenje za skladištenje i uplinjavanje prirodnog plina,
- FRU (eng. Floating Regasification Unit – FRU) terminal, plutajuće postrojenje za uplinjavanje,
- SRV (eng. Shuttleand Regasification Vessel System – SRV), brod za uplinjavanje i prijevoz prirodnog plina.

Plutajuće postrojenje za skladištenje i uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina može biti izvedeno iz brodova za prijevoz ukapljenog prirodnog plina koji su naknadno prenamijenjeni ili mogu direktno biti projektirani i izvedeni za takvu namjenu. Ovakva postrojenja imaju na palubi smještenu opremu za uplinjavanje. Sidre se u blizini mjesta potrošnje prirodnog plina ili blizu postojeće infrastrukture, a ukapljeni prirodni plin dobivaju od usporedno usidrenog specijalnog broda za prijevoz prirodnog plina. Na slici 2.1 prikazan je FSRU terminal, proces prijema ukapljenog prirodnog plina iz UPP tankera te procesi uplinjavanja i predaje plinovitog prirodnog plina u kopneni plinovod.



Slika 2.1. Prikaz prijema i predaje Prirodnog plina na FSRU postrojenju [2]

Opis koraka na slici 2.1.:

1 (eng. Tankers deliver LNG) - Tankeri dostavljaju ukapljeni prirodni plin

2 (eng. LNG is pumped onto FSRU) – Ukapljeni prirodni plin se pretovaruje na FSRU postrojenje

3 (eng. FSRU converts LNG into Gaseous state) – FSRU vrši uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina

4 (eng. Gas flows ashore via gas discharge arms) – Prirodni plin se transportira na obalu pomoću „ručica“ za otpremu

5 (eng. Gas metering station) – Mjerna regulacijska stanica

6 (eng. Natural gas is fed into gas grid) – Prirodni plin se predaje u kopneni plinovod, transportni sustav prema potrošačima.

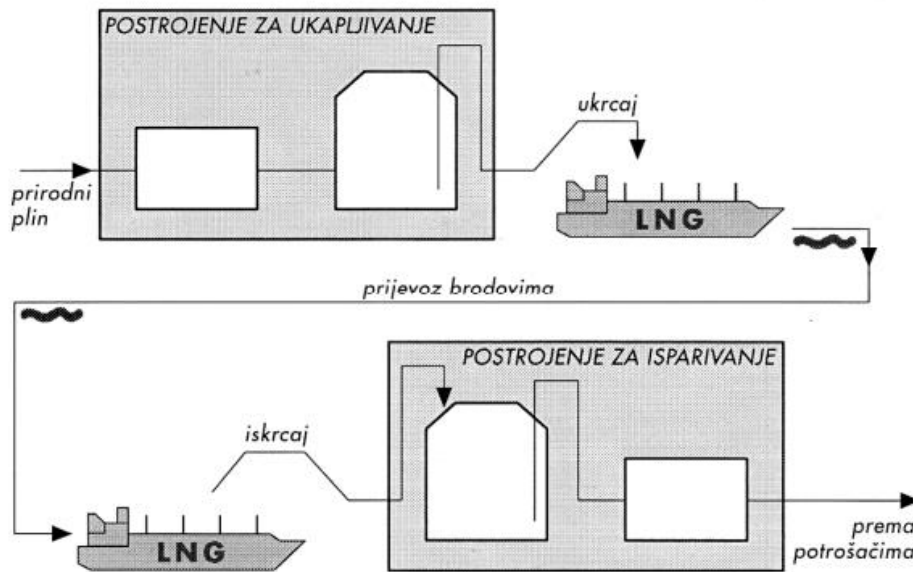
Plutajuće postrojenje za uplinjavanje služi za istovremeno uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina dok traje i njegov iskrcaj. Nema mogućnosti skladištenja već se prilikom uplinjavanja transportira u kopneni plinovod do potrošača.

Brod za prijevoz i uplinjavanje prirodnog plina (SRV) je danas najmanje isplativa opcija te se gotovo više ni ne koristi. Sistem je osmišljen na način da se brod spoji na sustav za istovar (koji se spaja sa trupom) zatim se vrši uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina i otprema u plinovod. Nakon toga se brod otpaja i odlazi po novu turu ukapljenog prirodnog plina. Kapacitet uplinjavanja i otpreme SRV broda je takav da se 140000 m<sup>3</sup> ukapljenog prirodnog plina uplinjuje i preda u kopneni plinovod unutar razdoblja od 6 dana, a vrijeme odlaska i dolaska po novu turu je 5-7 dana, što ga čini neisplativim kad se sve zbroji. [1]

### **2.1. FSRU postrojenja (plutajuća postrojenja za skladištenje i uplinjavanje prirodnog plina)**

Ukapljivanjem prirodnog plina postiže se isplativ način transporta velikih količina plina na udaljenija tržišta. Tehnološki lanac ukapljenog prirodnog plina je financijski zahtjevan i energetske intenzivan. Potrebni su brojni skupi elementi koji uključuju nabavu i dobavu prirodnog plina cjevovodima do postrojenja za tehnološku obradu, postrojenja za uplinjavanje, skladištenje i utovar na LNG tankere (slika 2.2.). Također moraju se uračunati troškovi

transporta brodovima, projektiranje i izvođenje postrojenja za prihvata i uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina i troškovi isporuke prema tržištu.



Slika 2.2. Pojednostavljeni prikaz procesa transporta UPP-a [5]

El Paso Corporation (Texas) je 2001. godine sklopio ugovor o izgradnji prvog plutajućeg postrojenja za skladištenje i uplinjavanje prirodnog plina. Sklapanje tog ugovora se smatra kao začetak djelatnosti plutajućih postrojenja za prihvata, skladištenje i uplinjavanje. [3]

Analiza plovnosti je jedan od najvažnijih dijela projektiranja FSRU-a. Analizom plovnosti se utvrđuje dostupnost FSRU-a. Pomicanje FSRU-a bi trebalo biti minimalno kako bi se omogućio normalan rad i život posade. Sustavom krmnih potisnika omogućava se pristajanje broda za prijevoz ukapljenoga prirodnog plina uz FSRU. Potisnici se još koriste za prilagođavanje u odnosu na puhanje vjetrova, te za održavanje FSRU-a u željenom prostoru, to jest unutar određenih granica.[4]

Plutajuće postrojenje za skladištenje i uplinjavanje prirodnog plina može se usidriti na plutaču ili na gat. Ako se FSRU sidri na plutaču, brod za prijevoz ukapljenog prirodnog plina može pristati isključivo paralelno uz FSRU (slika 2.3.). Ako se FSRU sidri na gatu, brod za prijevoz ukapljenog prirodnog plina može pristati paralelno uz FSRU ili s druge strane gata (slika 2.4.).



Slika 2.3. Sidrenje na plutači



Slika 2.4. Sidrenje na gatu

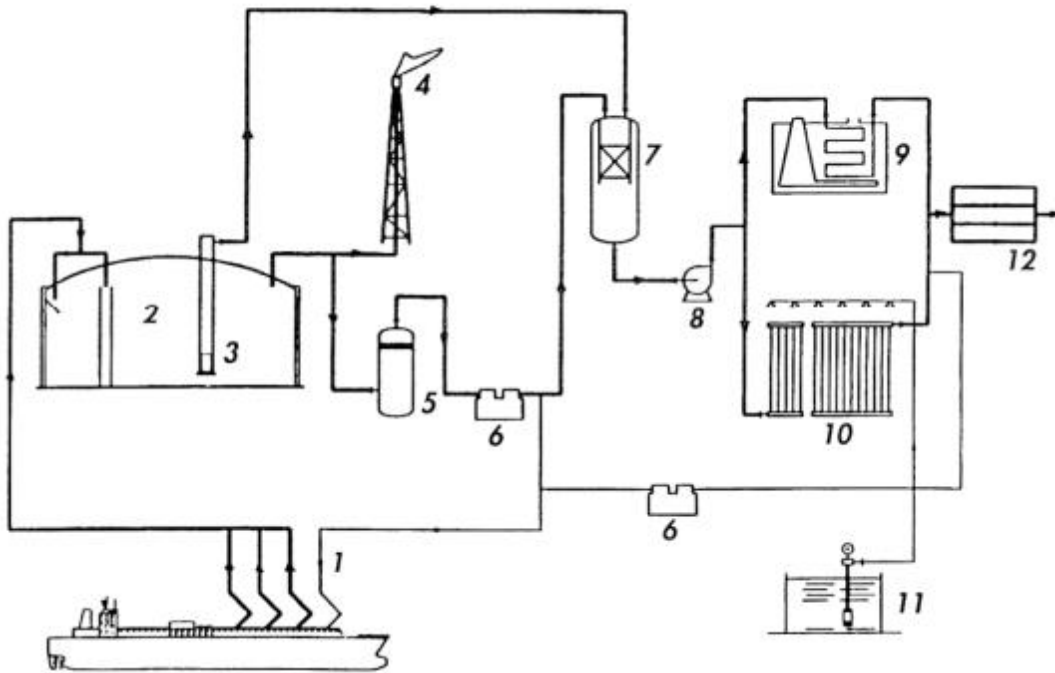
### 2.1.1. Princip rada FSRU postrojenja

Osnovni zadatci odobalnog postrojenja za skladištenje i uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina su [5]:

- prihvatanje ukapljenog prirodnog plina sa broda za prijevoz UPP-a,
- skladištenje UPP-a do njegovog uplinjavanja,

- te uplinjavanje i otprema UPP-a u kopneni plinovod.

Na slici 2.5. shematski je prikazan prihvatni terminal.



Slika 2.5. Shematski prikaz postrojenja za prihvat, skladištenje i uplinjavanje UPP-a [5]

Gdje je:

- 1 – Pokretni cjevovod
- 2 – Spremnik
- 3 – Niskotlačna crpka
- 4 – Baklja
- 5 – Separator
- 6 – Kompresori plina
- 7 – Rekuperator isparka
- 8 – Visokotlačna crpka
- 9 – Isparivač s izgaranjem plina

10 – Isparivač s morskom vodom

11 – Crpke morske vode

12 – Mjerna jedinica

Pomoću tri „istakalačke ruke“ (slika 2.6.) spojenih na pokretni cjevovod (na slici 2.5. broj 1 s lijeve strane) ukapljeni prirodni plin se prebacuje s tankera do spremnika gdje se potom skladišti (slika 2.5. broj 2). Proces se nastavlja sa niskotlačnom pumpom (slika 2.5. broj 3) koja iz spremnika uzima ukapljeni prirodni plin, te ga šalje do rekuperatora (slika 2.5. broj 7). Isparak prirodnog plina odlazi u separator gdje se dijeli na kapljevitu i plinovitu fazu. Plinovita faza se iz separatora putem kompresora (slika 2.5. broj 6) odvodi u rekuperator isparka (slika 2.5. broj 7) gdje se potom hladi i ukapljuje. Dio isparka potrebno je vratiti na tanker radi izjednačavanja tlakova u spremnicima (slika 2.5. broj 1 s desne strane). Kapljevita faza se iz rekuperatora putem visokotlačne pumpe šalje do isparivača s morskom vodom (slika 2.5. broj 10) ili do isparivača s potopljenim izgaranjem plina (slika 2.5. broj 9). U isparivaču dolazi do uplinjavanja kapljevite faze te se nakon toga odvodi u mjernu stanicu (slika 2.5. broj 12) gdje se dalje vrši otprema u transportne i distribucijske plinovode prema potrošačima.



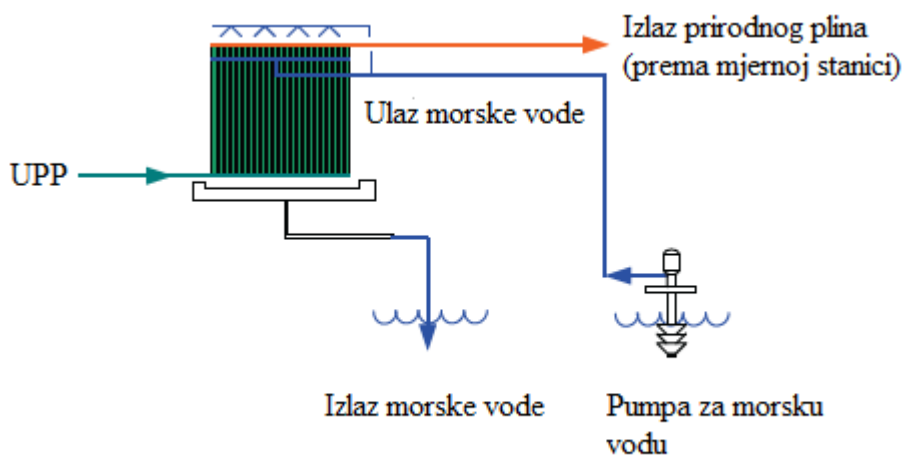
Slika 2.6. Istakalačke ruke [5]

### 2.1.2. Vrste isparivača kod odobalnih postrojenja za prihvat, skladištenje i uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina

Osnovne vrste isparivača koji se koriste za uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina su:

- ORV isparivači (eng. Open rack vaporizers) – otvoreni isparivači koji koriste morskou vodu u krugu izvora topline,
- SCV isparivači (eng. Submerged combustion vaporizers) – isparivači s uronjenim plinskim plamenikom (potopljeni isparivači),
- AAV isparivači (eng. ambient air vaporizers) – isparivači koji koriste toplinu atmosferskog zraka,
- IFV isparivači (eng. intermediate fluid vaporizers) – isparivači s radnom tvari u sekundarnom krugu između morske vode i ukapljenog prirodnog plina.

ORV isparivač je izmjenjivač topline koji koristi morskou vodu kao izvor topline. Koriste pouzdanu i dokazanu tehnologiju te imaju široku upotrebu u svijetu primjerice u Japanu, Koreji i Europi na kopnenim ili plutajućim postrojenjima za prihvat, skladištenje i uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina. Poželjna temperatura morske vode za rad ORV isparivača je iznad 5 °C. ORV jedinice općenito su izrađene od aluminijske legure potrebne mehaničke čvrstoće prikladne za rad na izrazito niskim temperaturama. Materijal ima visoki koeficijent toplinske vodljivosti, te je primjeren i učinkovit za opremu koja služi za prijenos topline. Cijevi su raspoređene u snopove, povezuju usis ukapljenog prirodnog plina i ispušne cijevne razdjelnike za uplinjeni prirodni plin. (slika 2.7.).



Paneli su izvana presvučeni legurom cinka zbog pružanja zaštite od korozije, koja može nastati radi djelovanja morske vode. ORV isparivači zahtijevaju redovito održavanje kako bi površina rebraste cijevi ostala čista. Raspored ploča omogućuje jednostavan pristup za održavanje. Ovisno o dizajnu jedinica, također je moguće izolirati dijelove panela i mijenjati opterećenje na jedinicama. Jedinica se može smanjiti kako bi se prilagodila fluktuacijama u potražnji plina, izlaznoj temperaturi plina i temperaturi morske vode. Za velike terminale za ponovno uplinjavanje gdje su potrebne značajne količine vode, mora se provesti dubinska analiza i procjena za sustave morske vode. Često su kasne promjene dizajna vrlo teške i skupe za implementaciju, stoga se ključna pitanja i parametri dizajna moraju utvrditi rano u projektu, kao što su [6]:

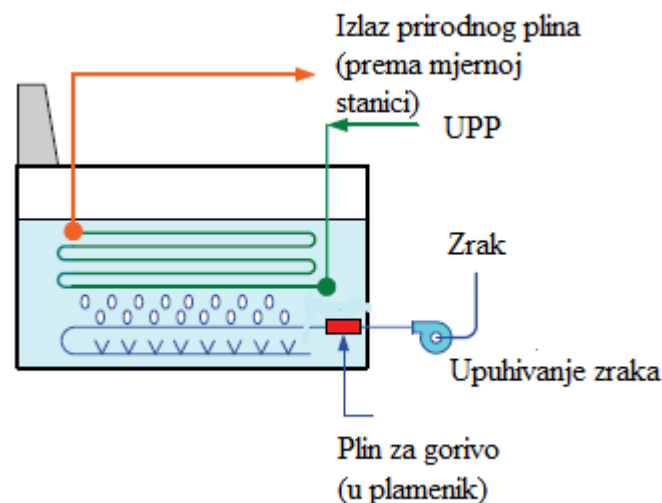
- Je li kvaliteta morske vode prikladna za rad ORV sustava?
- Sadrži li morska voda značajne količine iona teških metala?  
(ioni će „napasti“ premaz od legure cinka i aluminija i skratiti mu vijek trajanja).
- Sadrži li morska voda značajnu količinu pijeska i suspendiranih tvari? Prekomjerni talog uzrokovat će začepljenja cijevi za vodu u panelu. Odgovarajući sustav filtracije unosa morske vode mora biti dizajniran da spriječi ulazak mulja, pijeska i morskih organizama do pumpi i izmjenjivača morske vode.
- Projektom se moraju uzeti u obzir utjecaji sustava za unos i odvod morske vode na okoliš, te smanjiti uništavanje morskog života tijekom razdoblja izgradnje i normalnog rada postrojenja.
- Kloriranje morske vode neophodno je za usporavanje rasta morskog života. Međutim, zaostali klor u ispustu morske vode može utjecati na morski život i njegova se upotreba mora smanjiti. Temperatura morske vode mora biti u skladu s lokalnim propisima. Temperaturni pad morske vode na ispustu obično je ograničen na 5 °C na većini lokacija.
- Mora se proučiti mjesto dovoda i odvoda morske vode kako bi se izbjegao zahvat hladne morske vode.
- Ako se mjesto nalazi u području s hladnom klimom, može biti potrebno dodatno grijanje kako bi se osigurala željena temperatura izlaznog plina. Ispareni plin iz UPP spremnika može se koristiti kao gorivo za ove grijače.
- Potrebno je osigurati alternativne sustave za uplinjavanje koji se u slučaju potrebe mogu pokrenuti tijekom djelomičnog zatvaranja sustava uplinjavanja s morskom vodom ili tijekom rada s vršnom potrošnjomplina.



- Postrojenje za uplinjavanje UPP moguće je smjestiti u blizini izvora otpadne topline termoelektrana. Integracijom sustava uplinjavanja s izvorima otpadne topline može se smanjiti potrebu za uplinjavanjem i štetni utjecaj na okoliš.

Uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina korištenjem plina za grijanje troši otprilike 1,5% isparenog ukapljenog prirodnog plina kao goriva, što smanjuje proizvodnju postrojenja i prihod terminala. Zbog visoke cijene ukapljenog prirodnog plina, SCV isparivači koriste se samo u slučaju potrebe tijekom zimskih mjeseci kao nadopuna ORV isparivačima, kada morska voda ne može opskrbiti dovoljnu količinu topline za uplinjavanje. Također, mogu se koristiti za pružanje fleksibilnosti u ispunjavanju vršnih zahtjeva tijekom hladnih mjeseci. Plamenici SCV isparivača mogu biti dizajnirani za sagorijevanje isparenog plina niskog tlaka kao i ispušnog plina.

Tipični SCV isparivački sustav prikazan je na slici 2.8. Ukapljeni prirodni plin struji unutar zavojnice cijevi od nehrđajućeg čelika koja je uronjena u vodenu kupelj koja se zagrijava izravnim kontaktom s vrućim dimnim plinovima iz uronjenog plinskog plamenika. Dimni plinovi se raspršuju u vodi pomoću razdjelnika koji se nalazi ispod cijevi za prijenos topline. Raspršivanjem dimnih plinova u vodenoj kupelji potiče se turbulenciju koja rezultira velikim koeficijentima prijelaza topline i visokom toplinskom učinkovitošću (preko 98%). Turbulencija također smanjuje nakupljanje naslaga i kamenca na površinama izmjenjene topline.



Slika 2.8. Shematski prikaz SCV isparivača [6]

Budući da se vodena kupelj uvijek održava na konstantnoj temperaturi i ima visok toplinski kapacitet, sustav je pogodan za rad s naglim promjenama opterećenja i može se brzo uključiti i isključiti.

Vodena kupelj je kisela jer produkti izgaranja ( $\text{CO}_2$ ) kondenziraju u vodi. Lužnate kemikalije kao što su natrijev karbonat i natrijev bikarbonat mogu se dodati u vodenu kupelj kako bi se pH vrijednost kontrolirala, a cijevi zaštitile od korozije. Višak vode, nakon izgaranja, mora se neutralizirati prije ispuštanja u more.

Kako bi se emisije dušičnih oksida svele na najmanju moguću mjeru, mogu se koristiti plamenici s niskom emisijom dušičnih oksida da se zadovolji granica od 40 ppm. Razina dušičnih oksida može se dodatno smanjiti korištenjem sustava selektivne katalitičke redukcije (SCR), ukoliko je potrebno zadovoljiti strože zahtjeve emisije od 5 ppm, ali ta opcija značajno poskupljuje troškove.

SCV isparivačke jedinice su provjereno i vrlo pouzdano tehnološko rješenje, te imaju vrlo dobru povijest sigurnosti na radu. Istjecanje plina može se brzo detektirati detektorima ugljikovodika što će rezultirati pokretanjem preventivnih radnji kako bi se izbjegao požar u postrojenju. Nema opasnosti od eksplozije, zbog činjenice da temperatura vodene kupelji uvijek ostaje ispod točke paljenja prirodnog plina.

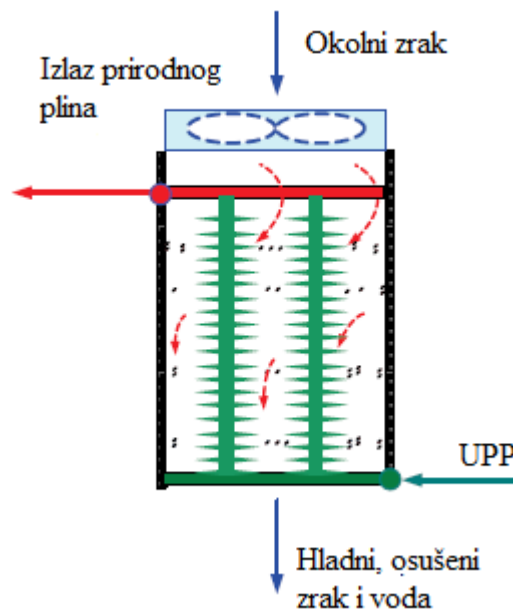
Sigurnost i održavanje isparivača s potopljenim izgaranjem (SCV) složenije je u usporedbi s ORV isparivačima. SCV ima više dijelova opreme koji se moraju održavati, kao što su ventilatori za dovod zraka, cijevi za rasprskavanje dimnih plinova i sustav upravljanja plinskim plamenikom. Prednost SCV isparivača je kompaktna izvedba odnosno manji volumen i površina izmjene topline u usporedbi s drugim isparivačima UPP-a.

Osim morske vode, zrak se također može koristiti kao izvor topline za uplinjavanje UPP-a u isparivačima s atmosferskim zrakom (AAV). Korištenjem zraka izbjegava se korištenje plina za gorivo i stvaranje stakleničkih plinova iz SCV isparivača. U lokacijama sa strogim pravilima za zaštitom okoliša, korištenje morske vode kao izvora topline najčešće nije dopušteno i, u tom slučaju, korištenje topline atmosferskog zraka je sljedeći najbolji izbor.

Izravni isparivači koji UPP uplinjuju pomoću atmosferskog zraka koriste vertikalne izmjenjivače topline. Zaledivanje cijevi na strani zraka zahtijeva odmrzavanje. Za potrebe automatskog odmrzavanja ugrađeni su ventili posebnih namjena, pomoću mjerača vremena (eng. timer) regulira se vrijeme potrebno za odmrzavanje (regulira period u kojem se otvaraju i

zatvaraju ventili). U usporedbi s drugim izvedbama UPP isparivača, isparivači koji koriste toplinu okolnog zraka zahtijevaju veće površine izmjene topline, a time i veći volumen za ugradnju.

Tipični AAV isparivački sustav prikazan je na slici 2.9. AAV se sastoji od izravnih kontaktnih, dugih, okomitih cijevi za izmjenu topline koje olakšavaju strujanje zraka prema dolje. To je zbog toga što se topliji zrak manje gustoće nalazi na vrhu isparivača dok se na dnu nalazi hladniji zrak veće gustoće.. Isparivači na okolni zrak koriste vertikalno strujanje zraka, u izvedbi prirodnog ili prisilnog strujanja. Kondenzacija vode i otopljeni led također se mogu skupljati i koristiti kao izvor servisne/pitke vode. Na vanjskoj strani isparivačkih površina nastaje kondenzacija vlage i zraka koja zaleđivanjem smanjuje izmjenu topline kapacitet uplinjavanja AAV isparivača.



Slika 2.9. Shematski prikaz AAV isparivača [6]

Kako bi se izbjeglo prekomjerno skupljanje leda na vanjskim površinama izmjenjivača topline, koriste se ciklusi odleđivanja od 4-8 sati. Dugi neprekidni radni ciklusi dovode do stvaranja gustog leda na vanjskim površinama izmjenjivača topline, što zahtijeva duže vrijeme odmrzavanja. Tijekom odmrzavanja se izmjenjivač topline isključuje iz pogona, a odmrzavanje se postiže prirodnim strujanjem zraka ili prisilnim strujanjem zraka pomoću ventilatora. Korištenje ventilatora, koji uzrokuje prisilno strujanje zraka, skraćuje vrijeme odmrzavanja, ali

povećava troškove pogona. Skraćivanje vremena odmrzavanja obično nije značajno jer je prijenos topline ograničen slojevima leda koji djeluju kao toplinski izolator.

Magla oko područja isparivača može predstavljati problem vidljivosti, što nastaje kondenzacijom vlažnog zraka izvana. Opseg stvaranja magle ovisi o mnogim čimbenicima, kao što su udaljenost između jedinica, uvjeti vjetra, relativna vlažnost i temperatura okoline.

Učinkovitost isparivača na okolni zrak ovisi o ulaznim i izlaznim uvjetima ukapljenog prirodnog plina i što je još važnije o uvjetima lokacije i karakteristikama okoline, kao što su temperatura i relativna vlažnost zraka, vjetar, sunčevo zračenje i blizina susjednih struktura.

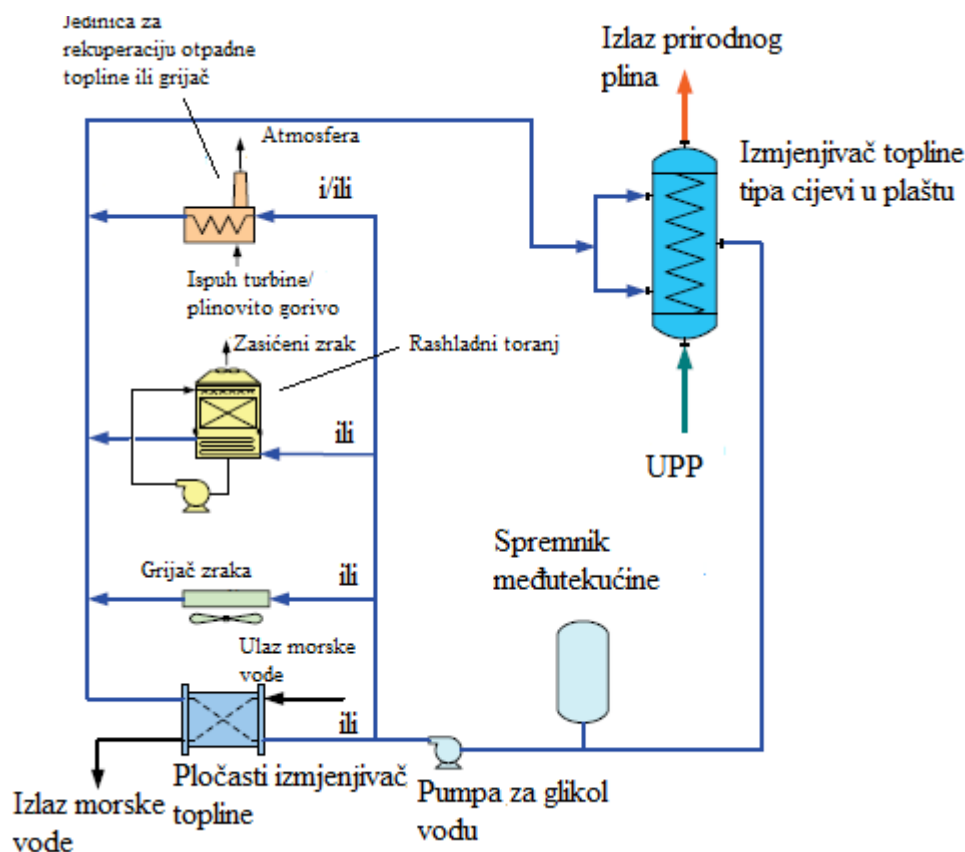
Isparivač UPP-a na okolni zrak ima prednost u ekvatorijalnim područjima s vrućom klimom gdje je temperatura okoline visoka tijekom cijele godine. U područjima s hladnijom klimom, gdje su zimske temperature niže, potrebno je dodatno grijanje kako bi se postigla potrebna temperatura uplinjavanja .

Isparavanje ukapljenog prirodnog plina putem radne tvari u sekundarnom krugu (IFV) koristi radnu tvar za prijenos topline u zatvorenom krugu kako bi se postiglo odvajanje primarnog kruga izvora topline (morska voda) i tercijarnog kruga ukapljenog prirodnog plina koji se uplinjuje. Tri vrste radnih tvari za prijenos topline obično se koriste za isparavanje ukapljenog prirodnog plina:

- Glikol-voda
- Radna tvar na bazi ugljikovodika (propan, butan ili smjesa ugljikovodika)
- Vruća voda

IFV isparivač najčešće koristi glikol-vodu kao radnu tvar u sekundarnom krugu.. Za ovu primjenu prikladni su etilen glikol ili propilen glikol ili druge tekućine za prijenos topline s niskom temperaturom smrzavanja. Prijenos topline za uplinjavanje UPP-a događa se u izmjenjivaču topline sa snopom cijevi u plaštu. Topla struja glikol-voda prolazi kroz isparivač gdje predaje toplinu ukapljenom prirodnom plinu.

Pojednostavljena skica IFV isparivača s morskom vodom kao glavnim izvorom topline i raznim dodatnim izvorima topline (okolni zrak, otpadna toplina, plinski kotao) prikazana je na slici 2.10. IFV isparivač je konvencionalni izmjenjivač tipa cijevi u plaštu koji je također poznat pod nazivom cijevni isparivač. IFV isparivači glikol-voda su vrlo kompaktni izmjenjivači topline visokih koeficijenta prijelaza topline i mogućnosti rada na velikim temperaturama.



Slika 2.10. Shematski prikaz IFV sustava isparivanja sa raznim pomoćnim izvorima topline [6]

Trenutačno, isparivači s glikol-vodom čine mali udio (oko 5%) ukupnog tržišta uplinjavanja prirodnog plina diljem svijeta. Neka postrojenja za uplinjavanje UPP-a kao dodatni izvor topline koriste zagrijače na okolni zrak ili rashladni toranj.

Postoji nekoliko opcija za zagrijavanje glikol-vode u sekundarnom krugu kao što su:

- Zračni grijač,
- rashladni toranj,
- grijač morske vode,
- sustav za povrat otpadne topline ili grijač.

Korištenje zraka za grijanje stvara kondenzat, posebno u područjima s visokim temperaturama i vlažnostima zraka. Kondenzat je kvalitete kao i kišnica koja se može skupljati i pročišćavati za potrebe korištenja vode u postrojenju i/ili izvoziti kao svježja voda. Konvencionalni rebrasti izmjenjivač zraka sastoji se od rebrastih cijevi čija se učinkovitost izmjene topline smanjuje stvaranjem leda. Upotrebom radne tvari u sekundarnom krugu kao što je glikol-voda,

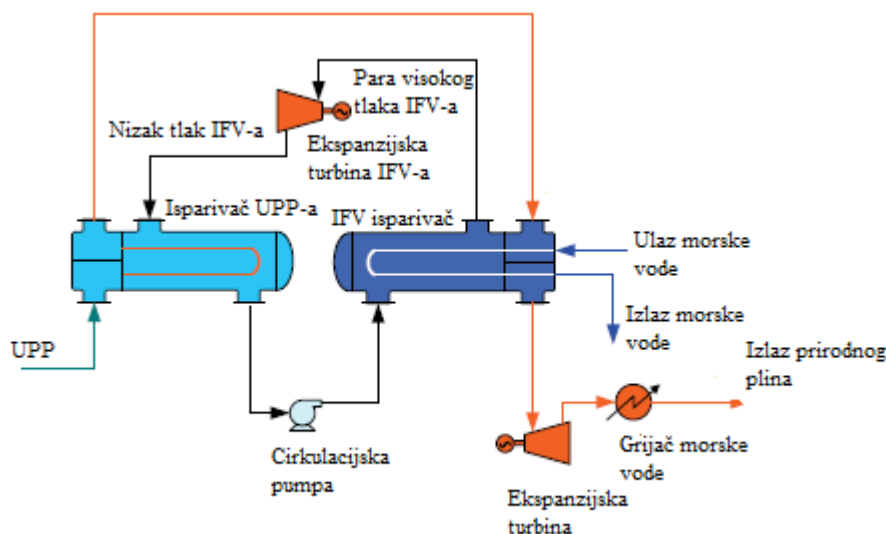
temperatura radne tvari može se održavati na temperaturi višoj od temperature smrzavanja vode čime se izbjegavaju problemi zaleđivanja.

Slično tome, rashladni toranj uzima toplinu iz okoline izravnim kontaktom između vode u rashladnom tornju i zraka iz okoline. Voda iz rashladnog tornja predaje toplinu radnoj tvari u sekundarnom krugu u pločastom izmjenjivaču topline

Umjesto glikol vode, kao radna tvar u sekundarnom krugu mogu se koristiti ugljikovodici (propanbutan ili dr.). Upotrebom ugljikovodika izbjegavaju se potencijalni problemi smrzavanja morske vode. Ovaj raspored isparivača omogućuje korištenje hladne morske vode od čak 1 °C kako bi se smanjila potrošnja goriva u zagrijaču.

Zagrijavanje ukapljenog prirodnog plina postiže se pomoću dva izmjenjivača topline koji rade u seriji. Prvi izmjenjivač koristi latentnu toplinu kondenzacije propana za djelomično zagrijavanje prirodnog plina, dok drugi izmjenjivač topline koristi morsku vodu za daljnje zagrijavanje prirodnog plina do konačne temperature. Drugi se izmjenjivač također koristi za isparavanje propana koji potom ponovno odlazi u prvi izmjenjivač topline.

Budući da se zagrijavanje morskom vodom događa samo u drugom izmjenjivaču, izbjegava se izravan kontakt s ukapljenim prirodnim plinom na veoma niskoj temperaturi, te se stoga izbjegava smrzavanje morske vode. Iz tog se razloga morska voda temperature blizu ledišta može koristiti u ovoj konfiguraciji. Osnovna shema sustava prikazana je na slici 2.11.



Slika 2.11. Shematski prikaz IFV isparivačkog sustava sa ugljikovodikom kao radnom tvari u sekundarnom krugu[6]

Dodatkom ekspanzijskih turbina, propan ili butan se mogu koristiti kao radni fluid za proizvodnju električne energije. U većini objekata tlak plina u cjevovodu niži je od ispusnog tlaka izlazne visokotlačne pumpe i postoji mogućnost za proizvodnju električne energije. Na primjer, kada se ukapljeni prirodni plin pumpa na 100 bara ili više, zagrijava se i zatim ekspandira na tlak od 30 bara, iz čega se može proizvesti energija. Ekspandirani plin se hladi i treba ga ponovno zagrijati morskom vodom kako ne bi došlo do kondenzacije težih ugljikovodika u plinovodu.

Električna energija proizvedena u kriogenom Rankineovom kružnom procesu može se koristiti u postrojenju za uplinjavanje UPP-a i povećanje energetske samodostatnosti postrojenja. Električna energija može se proizvesti bez dodatnog dovođenja goriva ili emisija stakleničkih plinova, što je vrlo privlačno za većinu terminala. U kriogenom Rankineovom ciklusu, radna tvar isparuje i pregrijava se u isparivaču pomoću topline iz okolnog zraka ili morske vode, ekspandira u turbini i predaje latentnu toplinu kondenzacije UPP-u koji se pritom uplinjuje.

## **2.2. Brodovi za prijevoz ukapljenog prirodnog plina**

Brodovi za prijevoz ukapljenog prirodnog plina (engl. LNGC – liquid natural gas carriers) su specijalizirana vrsta brodova koji ispunjavaju zahtjevne propise. Međusobno se razlikuju po vrsti spremnika koji je na njih ugrađen. Prijevoz ukapljenog prirodnog plina se vrši pri temperaturi plina od  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$  i atmosferskom tlaku (101325 Pa). Maksimalna zapremnina ovakvih brodova u prosjeku iznosi između 125000 i 135000  $\text{m}^3$ . [7]

Važni zahtjevi koje brodovi za prijevoz ukapljenog prirodnog plina moraju ispuniti [5]:

- UPP ne smije doći u dodir sa materijalima u okolini koji pri toj temperaturi postaju lomljivi,
- nužno je spriječiti nastajanje eksplozivne smjese ukoliko prirodni plin uđe u prostor sa zrakom ili zrak uđe u prostor s plinom, DGE = 4% i GGE = 16% za smjesu prirodnog plina i zraka,
- potrebno je udaljiti izvore zapaljenja (otvoreni plamen, iskrenje, vruće površine) iz prostora gdje bi zrak i plin mogli doći u međusobni dodir, temperatura samozapaljenja metana iznosi  $540\text{ }^{\circ}\text{C}$
- LNG tankeri grade se s dvostrukom oplatom koja ograničava oštećenja uslijed mogućih nesreća (sudara, nasukavanja,..), poboljšava krutost broda i stvara balastni prostor.

### 2.2.1. Vrste sustava za prijevoz ukapljenog prirodnog plin

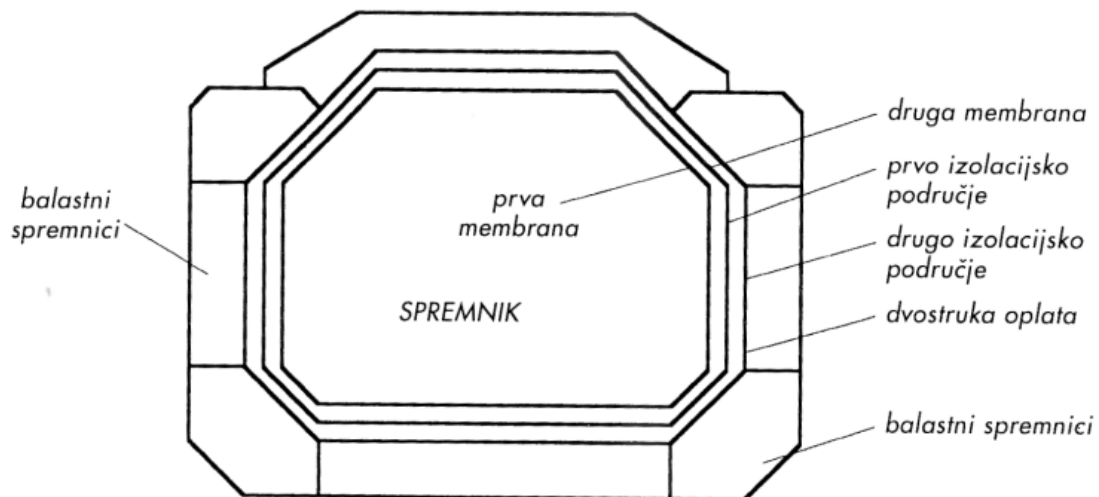
Vrste sustava za prijevoz ukapljenog prirodnog plina na LNGC brodovima dijele se na membranske i samonosive. Pod membranske sustave spadaju [5]:

- TGZ (Technigaz) Mark III
- GT (Gaztransport) No. 96
- GTT (Gaztransport & Technigaz) CS-1 (eng. combined system 1)

Pod samonosive sustave spadaju:

- Kuglasti (Moss)
- Prizmatski (tip B).

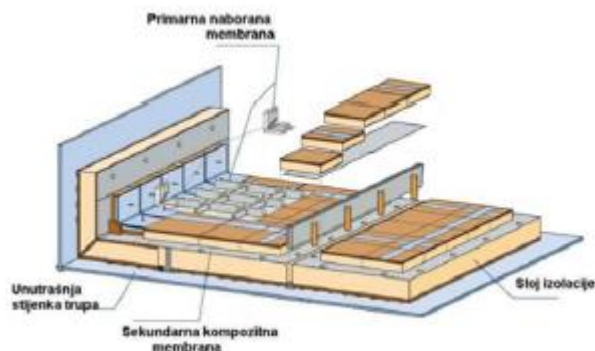
TGZ Mark III je membranski spremnik koji se sastoji od 2 membrane i 2 sloja toplinske izolacije. Na slici 2.12. prikazan je presjek takvog spremnika.



Slika 2.12. Prikaz TGZ Mark III spremnika [5]

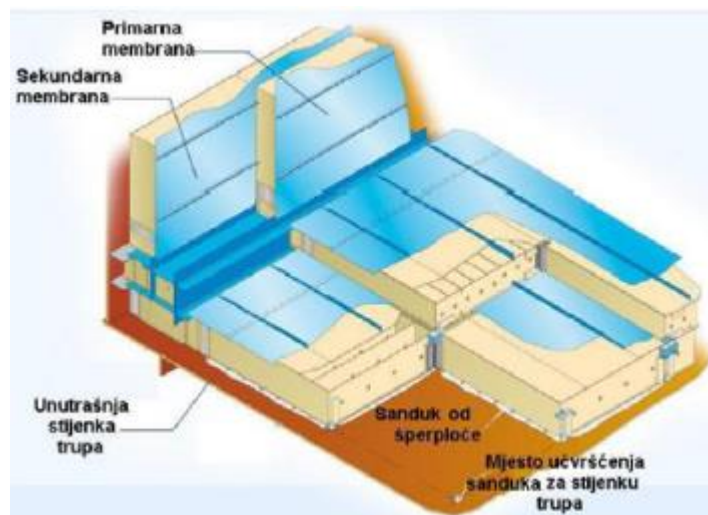
Prva membrana napravljena je od nehrđajućeg čelika stijenke debljine 1,2 mm, naborana je radi toplinskog skupljanja i rastezanja membrane. U prvom izolacijskom području nalazi se armirana poliuretanska pjena debljine od 250 - 350 mm. U samoj izolaciji nalazi se i sekundarna membrana koju čini aluminijska folija u kombinaciji sa vlaknima od stakloplastike. Izolacija se postavlja u sanduke od šperploče. Na slici 2.13. prikazan je presjek stijenke takvog spremnika. [8]





Slika 2.13. Presjek stijenke TGZ Mark III spremnika [8]

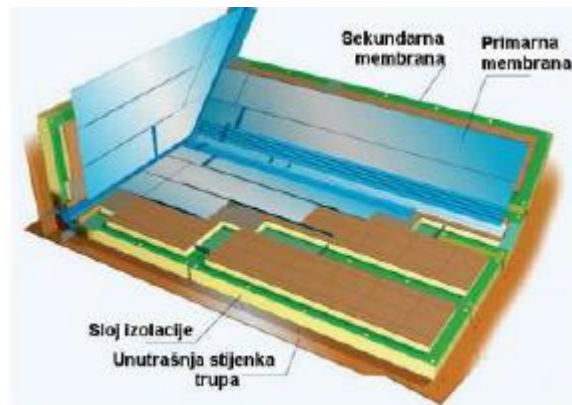
GT No.96 membranski je spremnik sastavljen od dvije metalne membrane (invar - legura čelika i nikla, 36 % nikla), stijenke debljine 0,7 mm i 2 sloja izolacije (perlit) u sanducima od šperploče (debljine stijenke od 470 do 550 mm). Primarna uloga metalnih membrana je da spriječe istjecanje UPP-a iz spremnika, dok izolacija služi kako bi se spriječili dobici topline i samim time prekomjerno isparavanje UPP-a unutar spremnika. Prva metalna membrana je u samom dodiru s UPP-om, na nju se stavlja prvi sloj izolacije, slijedi sekundarna membrana i novi sloj izolacije koji se potom pričvršćuju na trup broda. Na slici 2.14. prikazan je presjek stijenke takvog spremnika.



Slika 2.14. Presjek stijenke GT No. 96 spremnika [8]

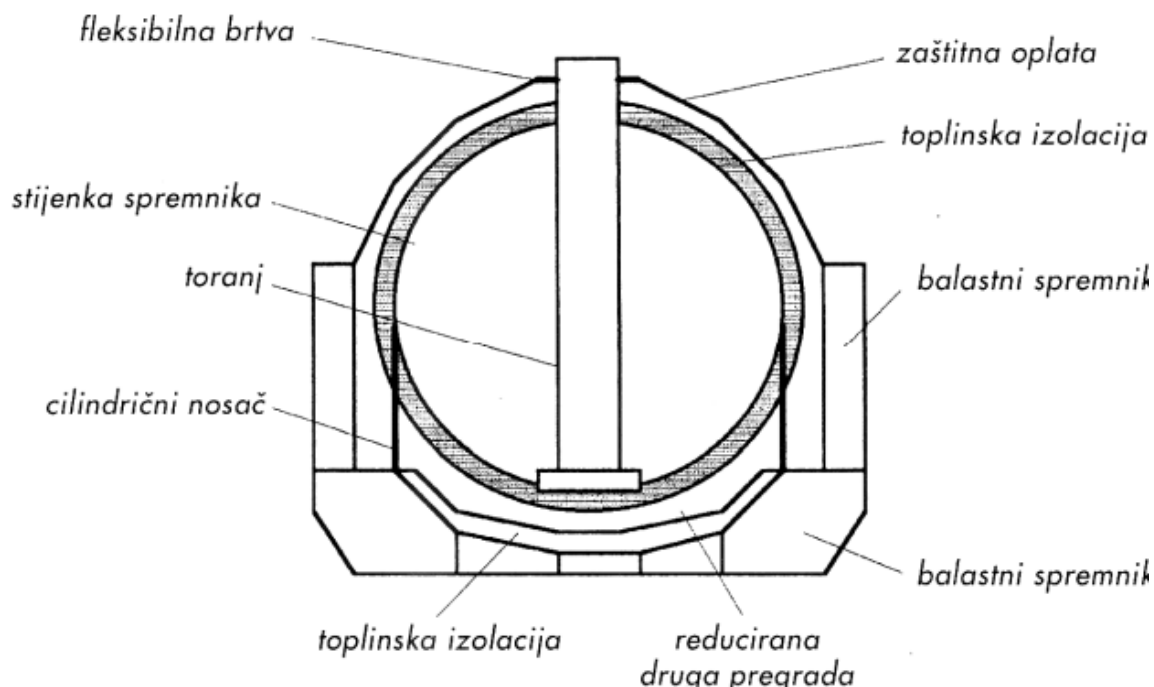
GTT CS-1 je spremnik koji je ujedinio karakteristike Mark III i No. 96 spremnika. Sastavljen je slično kao i prethodna dva spremnika, primarna i sekundarna membrana te nakon svake

membrane sloj izolacije. Primarna membrana napravljena je od invara debljine stijenke 0,7 mm na koju se veže sloj izolacije. U sloju izolacije nalazi se sekundarna membrana sastavljena od 2 sloja mreže staklenih vlakana između koji je smještena aluminijska folija. Izolacija se smješta u drvene sanduke te potom montira na primarnu membranu. Na slici 2.15. prikazan je presjek stijenke takvog spremnika.



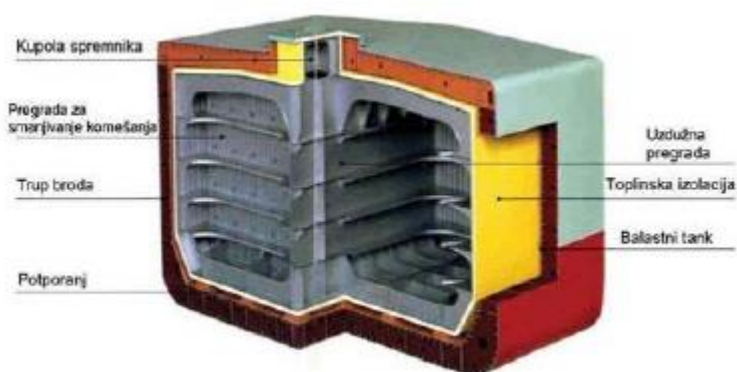
Slika 2.15. Presjek stijenke GTT CS-1 spremnika [8]

Kuglasti Moss spremnici su vrsta samonosivih spremnika patentiranih 1979. godine u brodogradilištu Moss Rosenberg Verft. Zbog svog okruglog oblika ne ispunjavaju čitav trup broda te na taj način gube na ekonomičnosti, međutim lakše ih je pregledavati izvana, a geometrijski oblik kugle posjeduje najmanji omjer površine i volumena što smanjuje dobitke topline. Izrađeni su od legure aluminija (gornji dio cilindra) i nehrđajućeg čelika (donji dio cilindra), te imaju debljinu stijenke od 50 mm. Izolacija je pričvršćena s vanjske strane cilindra zakovicama i sastoji se od sloja izolacijskih ploča od poliuretanske pjene debljine 250 mm. S vanjske strane izolacije pričvršćene su aluminijske ploče. Središnji prsten služi za preuzimanje bočnog opterećenja, dok vertikalno opterećenje preuzima cilindar koji je navaren na prsten. Na slici 2.16. prikazan je presjek konstrukcije kuglastog spremnika.



Slika 2.16. Presjek kuglastog (Moss) spremnika [5]

Prizmatski tankovi (tip B) su samonosivi spremnici prizmatskog oblika. Sastavljeni su od legure aluminija i čelika s 9% nikla, te izolacije od poliuretanske pjene debljine 250 mm. Spremnik je osmišljen na način da se unutar njega nalaze pregrade. Jedna pregrada je paralelna s uzdužnom osi broda dok je druga pregrada okomita na nju. Na pregrade su s unutarnje strane stijenke zavarena rebra (služe za učvršćenje konstrukcije). Svrha tih pregrada je smanjenje zapluskivanja ukapljenog prirodnog plina tijekom plovidbe. Na slici 2.17. prikazan je presjek takvog spremnika. Za preuzimanje vertikalnog opterećenja spremnika zaslužni su potpornji na kojima je spremnik postavljen. Konstrukcijski je omogućeno skupljanje i rastezanje spremnika uslijed promjene temperature prilikom istovara i utovara ukapljenoga prirodnog plina.



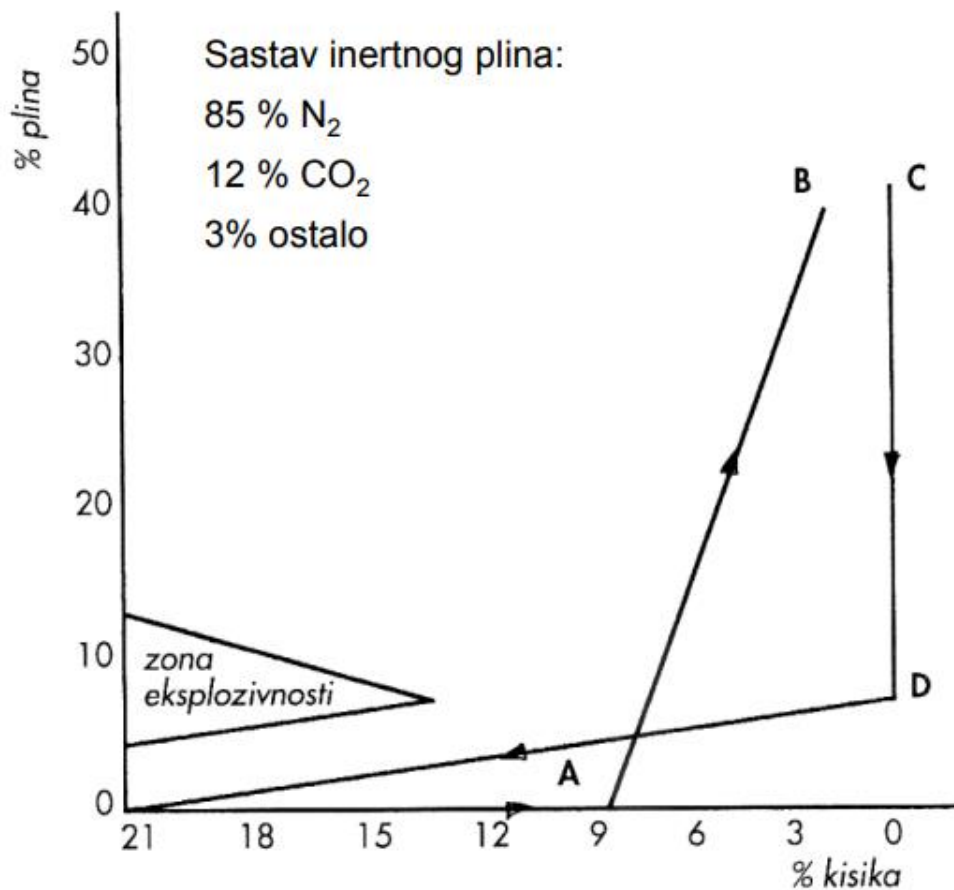
Slika 2.17. Presjek prizmatskog spremnika (tip B) [8]

## 2.2.2. Rukovanje teretom prilikom prijevoza ukapljenog prirodnog plina

Operacije koje se izvode na brodovima za prijevoz ukapljenog prirodnog plina su sljedeće [5]:

1. Inertiranje spremnika
2. Tlačenje spremnika
3. Hlađenje spremnika
4. Ukrcaj tereta
5. Razvod plina prema kotlovima
6. Iskrcaj
7. Grijanje spremnika

Inertiranje spremnika je operacija kojom sprječavamo opasnost od nastanka eksplozije u smjesi zraka i metana. Izvodi se prije početka plovidbe ili prije remonta broda na suhom doku zbog potrebe ulaska u spremnik. Slikom 2.18. opisan je proces inertiranja.



Slika 2.18. Prikaz inertiranja spremnika [5]

Operacije koje se provode prije puštanja broda u rad:

1. Linija 0A – istiskivanje suhog zraka iz spremnika inertnim plinom, postupak završava kada postotak kisika padne ispod 9%.
2. Linija AB – istiskivanje inertnog plina, tlačenje i punjenje spremnika UPP-om

Operacije koje se provode prije odlaska broda na suhi dok ili ulaska u spremnik:

1. Linija CD – pražnjenje spremnika od prirodnog plina utiskivanjem inertnog plina dok se ne postigne postotak prirodnog plina koji je ispod donje granice eksplozivnosti.
2. Linija D0 – pražnjenje spremnika i ispuštanje plina u atmosferu te utiskivanje suhog zraka u spremnik.

Stavljanje spremnika pod tlak plina je u suštini zamjena inertnog plina u spremniku metanom. Inertni plin se istiskuje dok se metan utiskuje, time se odstranjuje mogućnost kondenziranja vodene pare uslijed hlađenja spremnika. UPP putem isparivača i zagrijača isparuje i odlazi prema spremnicima, u spremnike ulazi s vrha, istiskuje inertni plin, koji izlazi putem cjevovoda za ukrcaj, koji se nalaze na dnu spremnika. Dok se ova operacija provodi brod je spojen s instalacijom na zemlji preko platforme za iskrcaj (traverz), koja se nalazi na sredini broda. Na platformi za iskrcaj brodski cjevovod se spaja s hidrauličkim pokretnim cjevovodom terminala. Vrijeme trajanja operacije je 12 sati [5].

Hlađenje spremnika je operacija koja se također provodi radi pripreme spremnika za primanje i prijevoz tereta. Cilj koji se želi postići je polagano ohlađivanje unutrašnje stijenke spremnika do temperature od  $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Na toj temperaturi može započeti ukrcavanje tereta. Ukapljeni prirodni plin se dovodi cjevovodima za raspršivanje pod tlakom od 3 bara do gornjeg dijela spremnika s kojeg se onda raspršuje po obodu spremnika. Regulacija tlaka plina vrši se kompresorom terminala. Vrijeme trajanja operacije je 16 sati. Hlađenje spremnika ponekad je potrebno i dok je brod već u eksploataciji. Ako je brod duže vremena na sidru, može se dogoditi da se spremnici ugriju i nisu više pogodni za ukrcaj ukapljenog plina. Problem se rješava na način da se u jednom od spremnika ostavi malo više ukapljenog plina, zatim se pomoću crpki za raspršivanje tim plinom hlade ostali spremnici koji su se ugrijali. Raspršivanje se vrši po obodu vrha spremnika [5].

Ukrcaj tereta odvija se putem traverza. Traverza je platforma za ukrcaj tereta na kojoj su hidraulični pokretni cjevovodi terminala spojeni sa cjevovodima broda brzozatvarajućim

zasunima. Kontrolu nad zasunima imaju i terminal i brod. Prije ukrcaja potrebno je provesti testiranje zasuna aktiviranjem zatvaranja zasuna u nuždi. Proces ukrcaja započinje pri malim tlakovima i malim količinama kako bi se spremnik ohladio, zatim se tlak poveća na 4 bara. Prilikom ukrcaja mora se voditi računa o količini ukapljenog plina koji se može ukrcati u spremnik. Spremnik se ne smije puniti iznad 98% jer bi moglo doći do prelijevanja UPP-a a samim time i dodira s okolinom što može izazvati oštećenja. Tlak u spremnicima održava sa na 1,1 bar, a kompresor terminala služi za reguliranje tog tlaka [5].

Ispareni plin kompresorom se tlači kroz zagrijač, zagrijava se na 20 °C, te se šalje do strojarnice, to jest do glavnih kotlova (na plamenik). Paralelno sa cjevovodom plina, prema kotlovima, postavljen je i cjevovod dušika. Dušik služi za propuhivanje cjevovoda, nakon dušika cjevovod se propuhuje plinom, sve to omogućuje sustav ventila i regulacije, a izvršava se prije puštanja plamenika u pogon. Kada brod vozi pri punoj snazi kompresor plina započinje sa radom. Regulacija tlaka plina vrši se promjenom broja okretaja kompresora. Pošto zbog sigurnosnih mjera u blizini plina ne smije biti električne opreme, regulacija je potpuno pneumatska [5].

Iskrcaj tereta je po svemu sličan proces ukrcaju tereta. Cjevovodi broda se povežu s terminalskim cjevovodima i započinje proces hlađenja terminalskih spremnika blagim ukrcajem ukapljenog plina. Nakon završetka hlađenja uključuju se i druge crpke te se postupno prazni teret broda. Vrijeme trajanja operacije je 15 sati. Regulacija tlaka u spremnicima može se vršiti na dva načina:

1. Terminal isporučuje plin u spremnike svojim kompresorom
2. Plin se isporučuje u spremnike putem broskog isparivača.

Iskrcaj plina se obavlja elektroničkim crpkama koje su smještene na dnu spremnika. Nakon završetka iskrcaja brod preuzima regulaciju tlaka u spremnicima. U spremnicima nakon iskrcaja mora ostati dovoljno plina koji ih održava hladnima [5].

Grijanje spremnika se provodi kako bi se ispario zaostali udio plina u spremniku. To je postupak koji se provodi prije inertiranja. Vrući plin temperature 50 °C upuhuje se u spremnik, zagrijava spremnik, te se neiscrpn dio plina zagrijava i isparuje. Ispareni plin se na vrhu usisava kompresorom, zagrijava se i zatim šalje na dno spremnika, postiže se povećanje tlaka i ubrzava se proces isparivanja. Ispareni plin se ispušta u okolinu ili putem kompresora šalje u kotlove na izgaranje. Nakon što plin ispari, nastavlja se zagrijavanje spremnika dok se ne postigne temperatura od 0 do 15 °C, koja je potrebna za početak inertiranja [5].

### **3. ODOBALNO POSTROJENJE ZA UPLINJAVANJE UKAPLJENOG PRIRODNOG PLINA – OMIŠALJ**

Odobalno postrojenje za uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina u Hrvatskoj nalazi se u općini Omišalj na otoku Krku. LNG terminal Krk započeo je s radom početkom 2021. godine. Uz postrojenje za uplinjavanje izgrađen je i otpremni plinovod Omišalj – Zlobin. Proces uplinjavanja prirodnog plina odvija se na plutajućoj jedinici za prihvat, skladištenje i uplinjavanje, te se zatim priključnim plinovodom transportira u transportni sustav Republike Hrvatske. Tehnički kapacitet postrojenja iznosi 2,9 milijardi metara kubičnih prirodnog plina godišnje.[9]

Postrojenje LNG terminala Krk sastoji se od 4 glavna dijela, a to su [5]:

1. Plutajuća jedinica za prihvat i uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina (FSRU brod)
2. Pristan koji sadrži sva pomoćna postrojenja i potrebne objekte
3. Visokotlačni priključni plinovod
4. Priključni vodovod

Na slici 3.1. prikazan je izgled postrojenja iz zraka.



Slika 3.1. LNG terminal KrkOmišalj [5]

#### **3.1. FSRU brod**

Hyundai Heavy Industries, južnokorejsko brodogradilište, 2005. godine je izgradilo brod pod imenom „Golar Viking“, brod koji je sagrađen za prijevoz ukapljenog prirodnog plina. Nakon

provedenog postupka nabave FSRU broda, „Golar Viking“ je preimenovan u „LNG Croatia“. Početkom 2020. godine u Kini je započela preinaka broda za prijevoz ukapljenog prirodnog plina u FSRU brod. Najbitniji dijelovi preinake bili su da se na brodu izgradi sustav za uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina, te ugradnja modula za proizvodnju električne energije. Sustav za uplinjavanje ugradio se na pramcu FSRU broda, dok se modul za proizvodnju električne energije ugradio na krmi broda. Nakon dovršetka preinaka, FSRU brod uplovio je u teritorijalno more Republike Hrvatske početkom prosinca 2020. godine. Nakon što se privezao u luci za posebne namjene terminala, započele su sve aktivnosti s pokretanjem rada. Prvi tanker ukapljenog prirodnog plina pristao je u terminalu 1. siječnja 2021. godine, te je time obilježen službeni početak rada terminala. Na slici 3.2. prikazan je dolazak prvog broda za prijevoz ukapljenog prirodnog plina.



Slika 3.2. Dolazak prvog LNG tankera - Tristar Ruby (SAD) [9]

Oprema FSRU broda „LNG Croatia“:

- Oprema za utovar i istovar ukapljenog prirodnog plina,
- četiri spremnika za ukapljeni prirodni plin,
- oprema za uplinjavanje,
- oprema za rukovanjem otparkom (engl. boil-off gas),



- oprema za otpremu prirodnog plina,
- strojarnica i postrojenja za proizvodnju električne energije,
- pogonska oprema,
- operatorske sobe,
- protupožarni sustavi
- i sva prateća postrojenja.

Maksimalna zapremnina broda iznosi 140206 m<sup>3</sup>, dok maksimalni satni kapacitet uplinjavanja iznosi 451840 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h (m<sup>3</sup>/h pri temperaturi 0 °C). „LNG Croatia“ isporučivati će 2,6 milijardi m<sup>3</sup>/godišnje što znači da će raditi prosječnim kapacitetom uplinjavanja od 300000 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h. Glavne tehničke karakteristike postrojenja prikazane su u Tablici 3.1.

Tablica 3.1. Glavne tehničke karakteristike terminala [9]

| Glavne tehničke karakteristike terminala za ukapljeni prirodni plin                         |               |
|---|---------------|
| Ukupni skladišni kapacitet FSRU broda (m <sup>3</sup> )                                     | 140206        |
| Maksimalni satni kapacitet uplinjavanja UPP-a (m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h)              | 451840        |
| Minimalni satni kapacitet uplinjavanja UPP-a (m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h)               | 60000         |
| Ukupni godišnji kapacitet uplinjavanja UPP-a (milijardi m <sup>3</sup> )                    | 2,6           |
| Maksimalni kapacitet pretovara s broda za prijevoz UPP-a na FSRU (m <sup>3</sup> /h)        | 8000          |
| Maksimalni radni tlak otpremnog plinovoda (bar)   | 100           |
| Kapacitet brodova za prijevoz UPP-a koji mogu pristati na terminal za UPP (m <sup>3</sup> ) | 3500 – 266000 |

### 3.2. Pristan

Uz FSRU brod glavnu infrastrukturu postrojenja za uplinjavanje prirodnog plina čini i pristan koji je izveden na pilotima (armirano-betonski stupovi). Pristan je sastavljen od više elemenata koji su povezani u funkcionalnu cjelinu. Glavna zadaća pristana je da FSRU brodu omogući siguran privez, nesmetanu i kontinuiranu komunikaciju s kopnom i pouzdanu otpremu plina na kopneni dio terminala. Također mora osigurati i posredni prihvata tankera za ukapljeni prirodni plin koji se, prilikom pretovara ukapljenog prirodnog plina, privezuje bočno uz FSRU brod. Poveznica koja čini plinsku liniju između FSRU broda i kopnenog dijela terminala su visokotlačne pretakačke ruke smještene na glavi pristana (centralni dio pristana). Cijelom dužinom pristupnog mosta položen je plinovod koji je povezan na pretakačke ruke, putem kojega se vrši otprema plina prema kopnu. Osim pretakačkih ruku, na glavi pristana također je smještena protupožarna oprema te sva ostala popratna pomoćna oprema koja omogućuje sigurno i operativno funkcioniranje terminala. Privezni sustav terminala čine niz priveznih i oslanjačkih utvrđica na koje su ugrađeni odbojnici i brzo-otpuštajuće kuke. Utvrđice su smještene na obje strane glave pristana. Privezna užad omogućuje vezanje FSRU broda za pristan (samim time i tankera ukapljenog prirodnog plina). Mora biti dovoljno čvrsta da zadrži FSRU brod na mjestu, ali i dovoljno elastična kako bi omogućila prirodne oscilacije gibanja FSRU broda sa gibanjem mora. Privezni sustav mora osigurati brzo i sigurno odvezivanje FSRU broda u slučaju opasnosti.

Kopneni dio terminala sadrži pomoćna postrojenja i objekte bez kojih ne bila moguća pouzdana i sigurna isporuka prirodnog plina. Centralni objekt kopnenog dijela terminala je upravljačka zgrada koja predstavlja operativno i administrativno sjedište terminala. Operateri su u upravljačkoj zgradi prisutni 24 sata na dan, a njihova je funkcija da osiguravaju kontinuirani nadzor rada čitavog postrojenja i upravljanje terminalom putem upravljačkog sustava. Instrumentacijska i električna oprema terminala, koja služi za povezivanje terminala u jednu funkcionalnu cjelinu, smještena je u pomoćnim prostorijama upravljačke zgrade. Za protupožarnu zaštitu terminala koristi se pumpna stanica sa spremnikom protupožarne vode te ugrađena hidrantska mreža. Za osiguranje i zaštitu terminala od ulaska neovlaštenih osoba postavljena je čuvarnica pristana, koja je smještena na ulazu. Također, cijeli terminal je ograđen dvostrukom visokom ogradom i postavljene su nadzorne kamere, što u kombinaciji sa zaštitarskom službom nudi visoku razinu sigurnosti na području cijelog postrojenja. Za održavanje i čišćenje priključnog plinovoda služi odašiljačko-čistačka stanica, koja predstavlja

ulaznu točku plinovoda putem koje je terminal za ukapljeni prirodni plin povezan na plinski čvor Omišalj 3.

Podzemni priključni plinovod, ukupne duljine 4188 metara i nazivnog promjera 1000 mm, izrađen je od bešavnih API 5L čeličnih cijevi. Maksimalni radni tlak plinovoda iznosi 100 bar. Smješten je između odašiljačko-čistačke stanice i plinskog čvora Omišalj. Njegova glavna funkcija je da vrši otpremu plina sa postrojenja za prihvata, skladištenje i uplinjavanje prirodnog plina do plinskog čvora Omišalj čime se prirodni plin predaje u plinski transportni sustav Hrvatske.

Priključni vodovod, ukupne duljine 2444,37 m i nazivnog promjera 90 mm, izrađen je od PEHD cijevi. Glavne funkcije priključnog vodovoda:

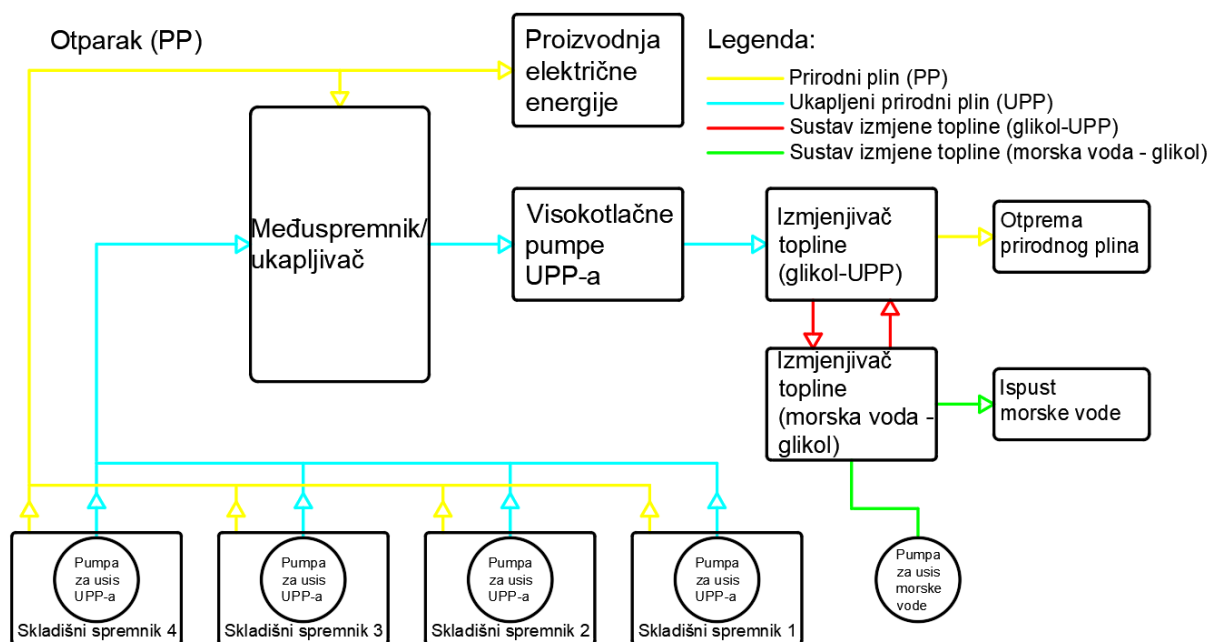
- osigurava pitku vodu,
- osigurava vodu za sanitarne potrebe,
- puni spremnik protupožarnom vodom i
- nadopunjava spremnik protupožarnom vodom.

### **3.3. Tehnološki procesi koji se odvijaju na LNG terminalu Krk**

Tehnološki procesi koji se odvijaju na postrojenju za prihvata, skladištenje i uplinjavanje LNG terminala Krk podijeljeni su u nekoliko skupina koje su međusobno povezane i zajedno čine cjelokupan proces:

- Proces pretovara ukapljenog prirodnog plina s tankera za ukapljeni prirodni plin na FSRU brod „LNG Croatia“,
- proces uplinjavanja ukapljenog prirodnog plina i otpreme plina prema transportnom sustavu,
- proces rukovanja otparkom (plin koji se stvara u spremnicima na FSRU brodu prilikom isparivanja tekućeg stanja)

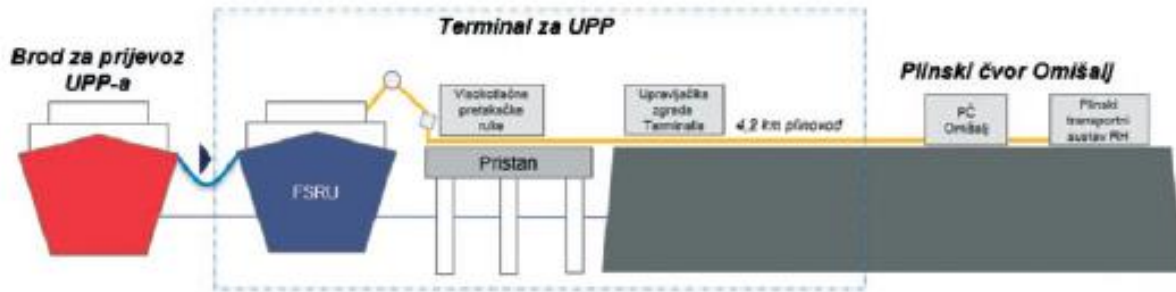
Uz gore navedene procese, na FSRU brodu se također proizvodi električna energija potrebna za procese FSRU-a i kopnenog dijela terminala. Shematski prikaz procesa koji se odvijaju na FSRU brodu prikazan je na slici 3.3.



Slika 3.3. Shematski prikaz procesa na FSRU brodu [9]

Proces pretovara ukapljenog prirodnog plina s tankera za transport ukapljenog prirodnog plina na FSRU brod označava početak tehnološkog procesa na postrojenju za prihvat, skladištenje i uplinjavanje na otoku Krku. Pretovar ukapljenog prirodnog plina odvija se putem kriogenih crijeva, gdje je maksimalni satni kapacitet pretovara ukapljenog prirodnog plina na FSRU brod  $8000 \text{ m}^3/\text{h}$ . Proces pretovara ukapljenog prirodnog plina počinje nakon što tanker za transport ukapljenoga prirodnog plina uspješno pristane i priveže se na FSRU brod, to jest LNG terminal. Proces pretovara počinje prebacivanjem dijela opreme FSRU broda na tanker za transport ukapljenog prirodnog plina, odnosno povezuju se kriogena crijeva FSRU broda s razdjelnikom tankera za transport UPP-a. Za pretovar tekuće faze prirodnog plina potrebna su četiri crijeva, dok se povrat otparka odvija kroz dva crijeva, a služi za stabilizaciju tlaka unutar spremnika za ukapljeni prirodni plin na LNG tankeru. Kod pretovara ukapljenog prirodnog plina s tankera, prazne se spremnici te je potrebno nadomjestiti pretovareni ukapljeni prirodni plin u spremnicima. To se postiže prirodnim plinom, ali u plinovitom agregatnom stanju, to jest otparkom, a sve da bi se spriječilo stvaranje podtlaka unutar spremnika za ukapljeni prirodni plin na tankeru, a posljedično i eventualnog narušavanja integriteta spremnika. Kriogena crijeva potrebno je ohladiti prije početka pretovara kako bi postigla potrebna radna temperatura čime se izbjegava termičko naprezanje. Također, potrebno je testirati sustave brzog otpuštanja crijeva i odvezivanja LNG tankera u slučajevima opasnosti. Nakon provedbe gore navedenih sigurnosnih radnji, započinje se s pretovarem UPP-a s LNG tankera na FSRU brod. Vrijeme

pretovara ovisi o količini ukapljenog prirodnog plina kojeg treba pretovariti, a maksimalni satni kapacitet pretovara iznosi 8000 m<sup>3</sup>/h, to jest 2000 m<sup>3</sup>/h za jedno crijevo. Nakon završetka postupka pretovara, crijeva je potrebno otpojiti, ugrijati na temperaturu okoline i skladištiti za potrebe budućih operacija. Prikaz procesa pretovara ukapljenog prirodnog plina prikazan je slikom 3.4.



Slika 3.4. Shematski prikaz procesa pretovara ukapljenog prirodnog plina [9]

Nakon pretovara određene količine ukapljenog prirodnog plina započinje proces strujanja prirodnog plina. Ukapljeni prirodni plin se s pumpama za usis ukapljenog prirodnog plina dovodi do međuspremnika. Međuspremnik se koristi kao dodatni spremnik između spremnika za ukapljeni prirodni plin i visokotlačnih pumpi ukapljenog prirodnog plina, time se sprječava narušavanje rada sustava u slučaju kvara, tj. naglog prestanka rada jedne od usisnih pumpi. Sprječava se kavitacija u visokotlačnim pumpama ukapljenog prirodnog plina koje može dovesti do oštećenja. Međuspremnik ima dodatnu funkciju ponovnog ukapljivanja (tzv. ukapljivač) otparka koji nastaje unutar sustava, a koji se ne može koristiti kao pogonsko gorivo.

Ukapljeni prirodni plin koji prolazi kroz međuspremnik svojim strujanjem dodatno ohlađuje otparak te omogućuje njegovo ukapljivanje, a tek potom ulazi u visokotlačnu pumpu ukapljenog prirodnog plina. Visokotlačne pumpe podižu tlak ukapljenog prirodnog plina na razinu tlaka u otpremnom plinovodu, to jest na razinu tlaka na izlazu iz sustava, koju određuje operator plinskog transportnog sustava. Nakon što je ukapljenom prirodnom plinu podignut tlak u visokotlačnim pumpama, ukapljeni prirodni plin odlazi u isparivač gdje potom dolazi do uplinjavanja.

Otparak nastaje zbog toplinskog toka koji, unatoč poboljšanoj toplinskoj izolaciji spremnika, uspijeva prodrijeti u spremnik i zagrijati ukapljeni prirodni plin, što je dovoljno da se ostvari promjena agregatnog stanja manjeg dijela ukapljenog prirodnog plina u plinovito stanje.

Otparak dovodi do povećanja tlaka u spremniku. Radi očuvanja integriteta spremnika, a posljedično i cijelog broda, tlak u spremniku mora se održavati unutar operativnih granica. To se može postići potrošnjom otparka, i to procesima kao što su:

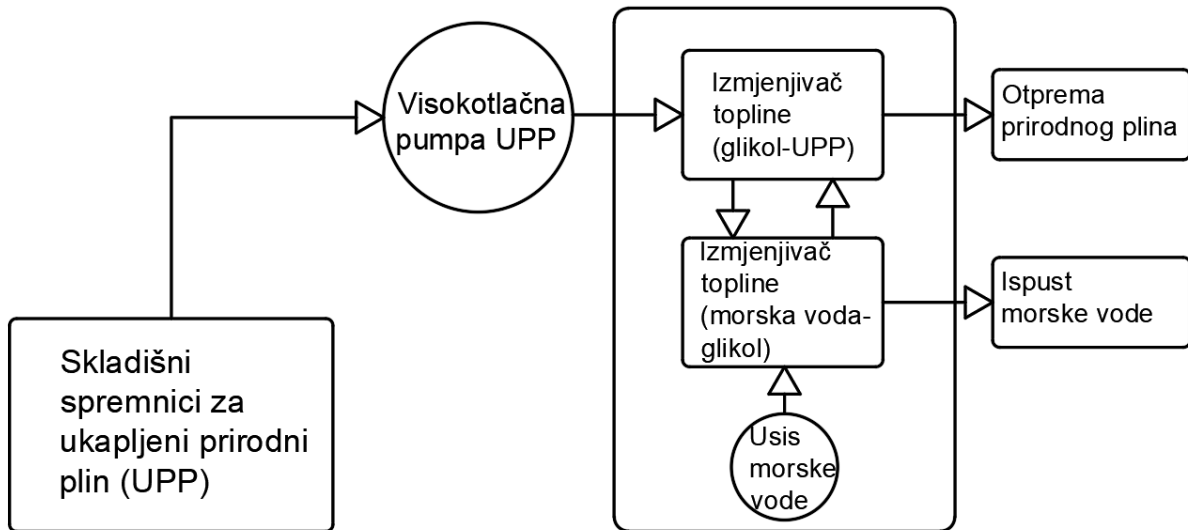
- ukapljivanje otparka,
- iskorištavanje otparka kao goriva za grijanje ili pogon LNG tankera,
- kompresija otparka,
- ventiliranje otparka.

Na 'LNG Croatia' ugrađeni su sustavi za rukovanjem otparkom koji pružaju mogućnost maksimalne optimizacije potrošnje otparka, to jest smanjivanje gubitaka postrojenja. Otparak se prvenstveno koristi kao gorivo u dvo-gorivnim plinsko/dizelskim motorima što je jedan od načina iskorištavanja otparka spaljivanjem. Drugi način spaljivanja otparka je spaljivanje u baklji. Spaljivanje otparka u baklji koristi se isključivo kada drugi načini korištenja otparka nisu mogući i služi kao zadnja mjera očuvanja integriteta spremnika uslijed rasta tlaka. Rukovanje otparkom kompresijom podrazumijeva kompresiju i otpremu neobrađenog otparka u plinski transportni sustav. Zbog navedenog razloga kompresor takvog tipa nije ugrađen na FSRU brod u LNG terminalu Krk. Ventiliranje otparka predstavlja oblik rukovanja otparkom u kojemu se višak isparenog plina ispušta izravno u atmosferu. Radi sigurnosnih mjera i mjera zaštite okoliša takav način rukovanja otparka je dozvoljen samo u slučaju krajnje nužde pa se ne koristi u standardnom radu LNG terminala.

Proces stvaranja otparka započinje u spremnicima na FSRU brodu, zatim se otparak komprimira i šalje prema dvo-gorivnim motorima i/ili prema ukapljivaču. Komprimirani otparak se iskorištava kao pogonsko gorivo, dok otparak koji se odvodi ka ukapljivaču putem visokotlačnih pumpi se ponovno pretvara u ukapljeni plin. Ovim načinom rukovanja otparkom smanjuje se gubitak plina u jedinici za spaljivanje (baklji) i negativni utjecaj na okoliš.

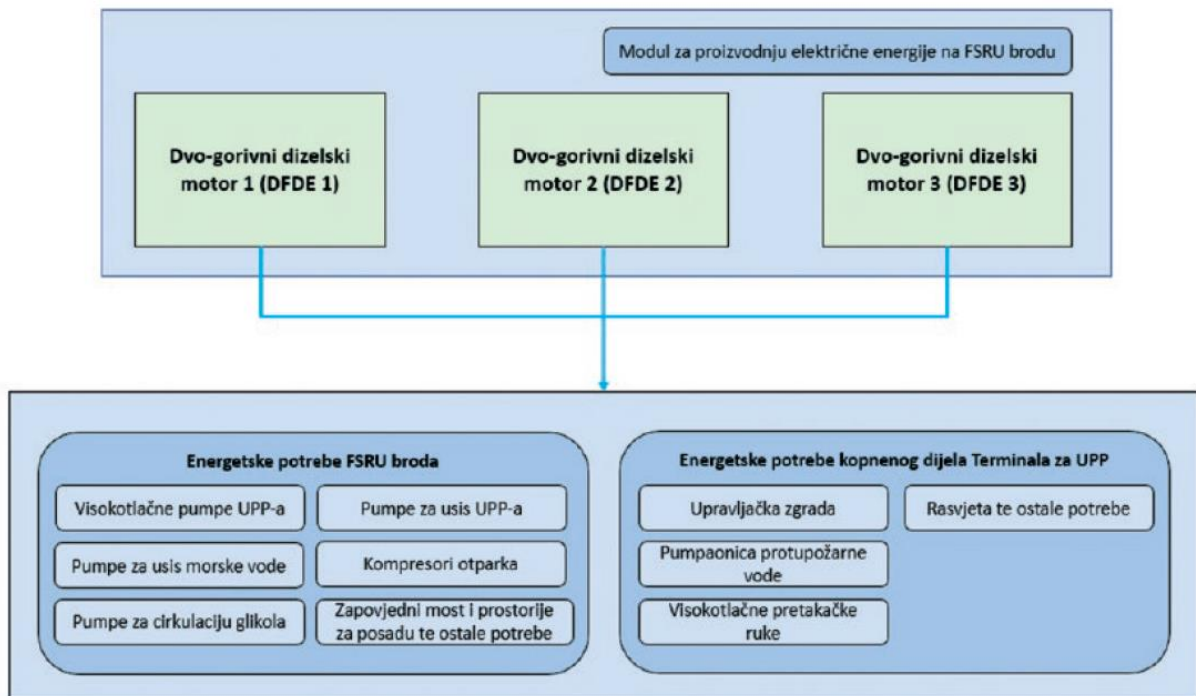
Kod procesa uplinjavanja ukapljenog prirodnog plina, toplina potrebna za grijanje ukapljenog prirodnog plina i postupni prijelaz prirodnog plina u plinovito agregatno stanje uzima se iz morske vode. Usisne (dobavne) pumpe tlače morsku vodu i šalju ju prema izmjenjivačima topline. Kod izmjenjivača topline, morska voda predaje toplinu etilen glikolu, koji se zatim koristi kao radna tvar u sekundarnom krugu za izmjenu topline između morske vode i ukapljenog prirodnog plina. Izmjena topline između etilen glikola i morske vode odvija se u pločastim izmjenjivačima topline. Sustav uplinjavanja bez radne tvari u sekundarnom krugu moguće je koristiti jedino u onim područjima gdje su temperature mora dovoljno visoke tako

da nema opasnosti od zaleđivanja sustava. Nakon što etilen glikol preuzme toplinu mora dalje ju predaje ukapljenom prirodnom plinu u izmjenjivaču topline tipa cijevi u plaštu. U ovom se izmjenjivaču topline, ukapljeni prirodni plin zagrijava i uplinjuje. Ohlađeni etilen glikol se vraća pumpom u pločasti izmjenjivač topline, gdje se ponovno zagrijava toplinom mora i pokreće novi krug izmjene topline. Korištenjem sustava s radnom tvari u sekundarnom krugu proces uplinjavanja UPP-a je optimiziran i minimalno utječe na okoliš. Proces strujanja etilen glikola i morske vode shematski je prikazan na slici 3.5.



Slika 3.5. Shematski prikaz procesa strujanja glikola i morske vode [9]

Pri potrebi uplinjavanja ukapljenog prirodnog plina koristi se značajna količina električne energije (reda nekoliko MW), koja se u prvom planu koristi za pogon velikih potrošača ugrađenih na FSRU brodu (visokotlačne pumpe, pumpe za usis morske vode, itd.). Također, kao što je već spomenuto, električnom energijom s FSRU broda opskrbljuje se i kopneni dio terminala, i to za operativni rad terminala (npr. upravljačka zgrada, protupožarni i pomoćni sustavi, sustavi rasvjete). Kako bi se proces optimizirao i smanjio gubitke plina u terminalu, kao pogonsko gorivo za proizvodnju električne energije koristi se otparak koji je nastao u spremnicima ukapljenog prirodnog plina. Električna energija proizvodi se u dvo-gorivnim motorima koji, osim otparka, mogu koristiti i diesel. Međutim, diesel se rijetko koristi kao gorivo za proizvodnju električne energije na FSRU brodu jer su količine otparka koje nastaju tijekom operativnog rada FSRU broda dovoljne za pogon elektrane. Rad elektroenergetskog sustava na FSRU brodu shematski je prikazan na slici 3.6.



Slika 3.6. Shematski prikaz rada elektroenergetskog sustava na FSRU brodu [9]

### 3.3.1. Procjena potrošnje plina ako bi cijeli proces radio samo u zatvorenom krugu

U zatvorenom krugu za uplinjavanje koristi se toplina dobivena isključivo iz brodskih kotlova pogonjeni na prirodni plin. Potrebna toplinska snaga kotlova za uplinjavajne UPP-a iznosi 137,71 MW. Stupanj djelovanja takvih kotlova procjenjuje se na 80%, što znači da ulazna toplinska snaga treba iznositi 172,77 MW. Donja ogrjevna moć prirodnog plina iznosi 50 MJ/kg. U izrazu (3.1) prikazan je izračun za potrošnju prirodnog plina u kotlovima.

$$\dot{G}_m = \frac{\dot{Q}_k}{H_d} = \frac{172,77}{50} = 3,4554 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (3.1)$$

Gdje je:

$\dot{G}_m$  = maseni protok prirodnog plina u kotlovima (kg/s)

$\dot{Q}_k$  = ulazna toplinska snaga kotlova (MW)

$H_d$  = donja ogrjevna moć prirodnog plina (MJ/kg)



Prosječni satni kapacitet LNG terminala Krk iznosi 237514,892 kg/h, odnosno po sekundi 65,98 kg/s. Postotak prirodnog plina koji se potroši za uplinjavanje UPP-a izračunat je u izrazu (3.2).

$$PP_{\%} = \frac{\dot{G}_m}{\dot{G}_{LNG}} = \frac{3,4554}{65,98} = 0,0524 \rightarrow UPP_{\%} = 5,24\% \quad (3.2)$$

Gdje je:

$PP_{\%}$  = postotak prirodnog plina koji se troši na uplinjavanje UPP-a

$\dot{G}_m$  = maseni protok prirodnog plina (kg/s)

$\dot{G}_{LNG}$  = prosječni kapacitet LNG terminala Krk (kg/s)

### 3.4. Procjena utjecaja na okoliš

Tvari koje se koriste u procesu i utječu na okoliš dijele se na tvari koje ulaze u proces i tvari koje izlaze iz procesa. Količine tvari koje su procjenjene odnose se na najgori mogući slučaj.

Tvari koje ulaze u proces su gorivo, voda i razne kemikalije.

Goriva koja ulaze su prirodni plin i brodsko gorivo. U tablici 3.2. prikazane su procjenjene količine goriva koje sudjeluju u procesu.

Tablica 3.2. Procjenjena količina goriva koje ulazi u proces [10]

|  |           |
|--|-----------|
| Plin za uplinjavanje, ton/god              | 44898     |
| Plin za uplinjavanje, Nm <sup>3</sup> /god | 63000000  |
| Plin za motore, ton/god                    | 30034     |
| Plin za motore, Nm <sup>3</sup> /god       | 41960000  |
| Ukupno plin, ton/god                       | 74933     |
| Ukupno plin, Nm <sup>3</sup> /god          | 104690000 |
| Brodsko gorivo, m <sup>3</sup> /god        | 365       |

Voda koja ulazi u proces je većinom tehnološka voda, za što se koristi morska voda. Osim morske vode potrebno je procijeniti i ulaz pitke vode za potrebe osoblja. Procjenjena količina vode koja ulazi u proces dana je u tablici 3.3.

Tablica 3.3. Procjenjena količina slatke i morske vode koja ulazi u proces [10]

|   |           |
|---|-----------|
| Pitka voda, m <sup>3</sup> /god   | 450       |
| Protupožarna voda (morska voda), m <sup>3</sup> /god                      | 50180     |
| Vodena zavjesa (morska voda), m <sup>3</sup> /god                         | 420000    |
| Balastna voda (morska voda), m <sup>3</sup> /god                          | 4378735   |
| Rashladna voda za motore (morska voda),<br>m <sup>3</sup> /god            | 46244040  |
| Rashladna voda za periferne sustave<br>(morska voda), m <sup>3</sup> /god |           |
| Uplinjavanje u otvorenom krugu (morska<br>voda), m <sup>3</sup> /god      | 187328954 |
| Nadoknada vode za kotlove (morska voda),<br>m <sup>3</sup> /god           | 18048     |
| Ukupna količina tehnološke vode (sva<br>morska voda), m <sup>3</sup> /god | 238439958 |

Kemikalije koje ulaze u proces, a služe za rad FSRU-a i njegovo održavanje su:

- kemikalije za pripremu napojne vode,
- aditivi za rashladnu vodu,
- sredstva za čišćenje,
- boje i razrjeđivači i
- plinovi za zavarivanje (kisik, acetilen, argon, dušik).

Na brodu je potrebno držati količinu kemikalija potrebno za 3 mjeseca normalnog rada.

Tvari koje izlaze iz procesa su otpadne vode, emisije u zrak i kruti otpad.

Morska voda koja sudjeluje u procesu uplinjavanja se smatra čistom (po potrebi postoji i mogućnost obrade iste), te iz tog razloga ne spada u otpadne vode. Otpadne vode koje izlaze iz procesa su:

- sanitarne otpadne vode,
- kaljužne vode,
- onečišćene oborinske vode.

U tablici 3.4. prikazana je procjenjena količina otpadne vode.

Tablica 3.4. Procjenjena količina otpadne vode koja izlazi iz procesa [10]

|  |       |
|--|-------|
| Fekalne otpadne vode, m <sup>3</sup> /dan            | 2     |
| Potrošne sanitarne otpadne vode, m <sup>3</sup> /dan | 17    |
| Kaljužne otpadne vode, m <sup>3</sup> /dan           | 10    |
| Ukupno otpadne vode, m <sup>3</sup> /dan             | 29    |
| Ukupno otpadne vode, m <sup>3</sup> /god             | 10585 |

Oborinske vode se općenito smatraju čistim vodama, te se kao takve ispuštaju nazad u okoliš. Međutim ukoliko dođe do onečišćenja istih, odvođe se zajedno sa kaljužnim vodama u zasebne spremnike, te se kasnije predaju ovlaštenim osobama na zbrinjavanje.

Emisije u zrak do kojih dolazi prilikom rada terminala odnose se na FSRU brod i na brodove koji vrše dostavu UPP-a. Konkretno proučava se emisija sumporovih i dušičnih oksida, te čestica. U tablici 3.5. prikazane su maksimalne procjenjene količine emisija

Tablica 3.5. Procjenjene količine emisija u zrak [10]

|   | NO <sub>x</sub> (tona) | SO <sub>x</sub> (tona) | Čestice (tona) |
|---|------------------------|------------------------|----------------|
| FSRU                                      | 494,9                  | 5,5                    | 4,0            |
| Brodovi sa parno-turbinskim postrojenjima | 10,8                   | 0,8                    | 0,1            |
| Brodovi sa DFDE/TFDE motorima             | 12,5                   | 0,01                   | 0,03           |
| Brodovi sa sporohodnim dizelskim motorima | 49                     | 1,6                    | 1,7            |
| Tegljači tijekom manevriranja             | 13,3                   | 3,0                    | 1,2            |
| Protupožarni tegljač u pripravnosti       | 27,7                   | 6,2                    | 2,5            |
| UKUPNO                                    | 608,3                  | 17,1                   | 9,5            |

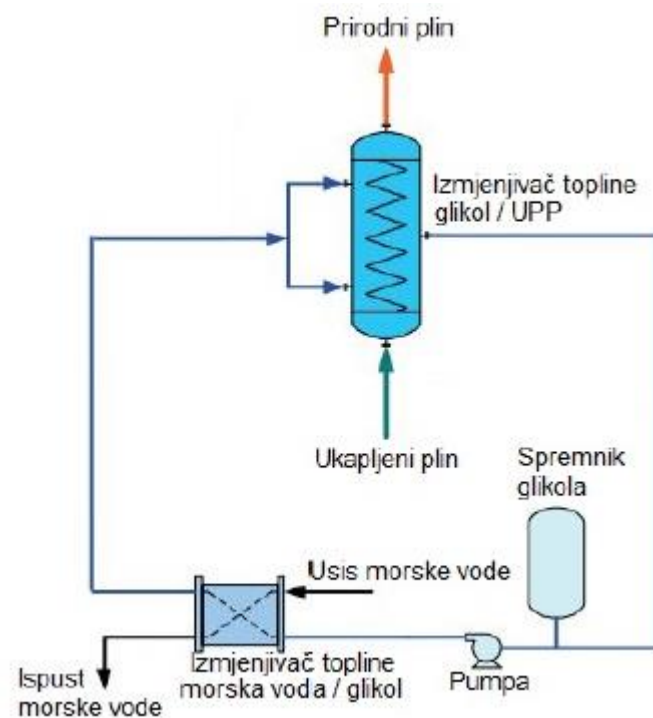
Iz tablice 3.5 vidi se da najveće onečišće zbog emisije u zrak dolazi od emisije dušičnih oksida iz goriva.

Kruti otpad koji nastaje radom postrojenja uglavnom generira posada broda i zastupnici održavanja. Skladišti se u posebnim kontenjerima te se predaje ovlaštenim osobama na zbrinjavanje. Očekivane grupe otpada koje će nastati:

- različita otpadna ambalaža,
- otpadni metali,
- vodeni tekući otpad namjenjen za obradu izvan mjesta nastanka otpada,
- otpad iz električne i elektroničke opreme,
- miješani komunalni otpad i biorazgradivi otpad iz kuhinja i kantina.

#### 4. PRORAČUN TERMODINAMIČKIH PROCESA U LNG TERMINALU KRK

Proračunom termodinamičkih procesa utvrditi će se dimenzije izmjenjivača topline potrebne za uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina u količini koja odgovara maksimalnoj zapremnini odobalnog postrojenja za prihvatanje, skladištenje i uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina na Krku. Sustav uplinjavanja koji se koristi je indirektni IFV sustav s radnom tvari etilen-glikol-voda u sekundarnom krugu i 2 izmjenjivača topline za prijenos topline s morske vode na UPP (slika 4.1).

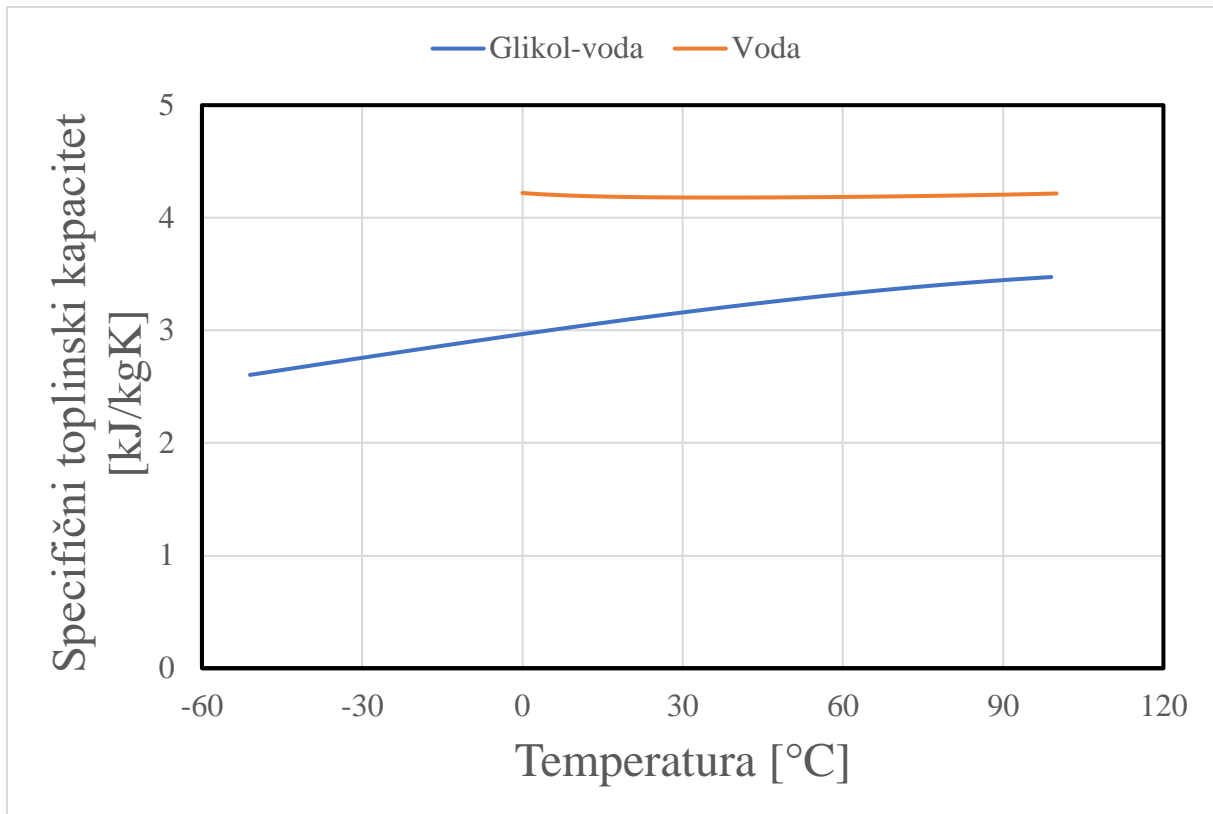


Slika 4.1. Shematski prikaz indirektnog STV isparivača [10]

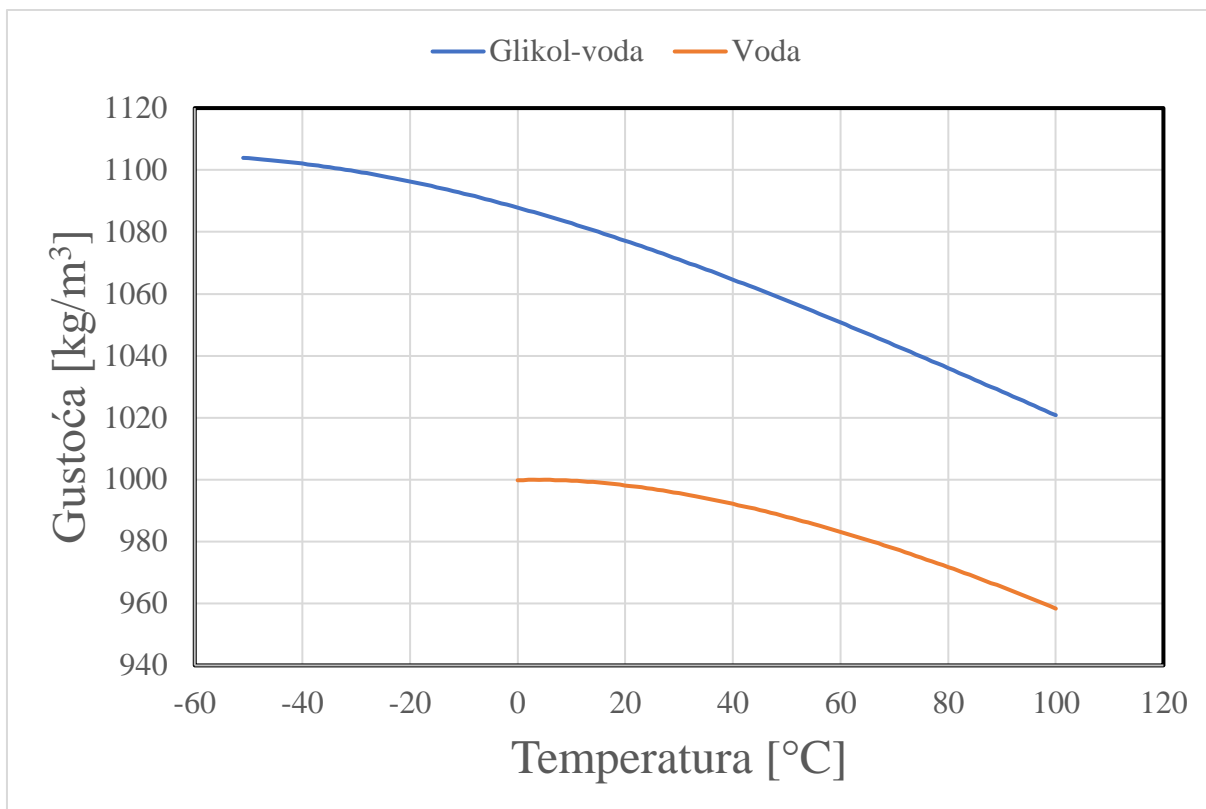
Prvi izmjenjivač topline je izmjenjivač pločastog tipa i služi za zagrijavanje smjese glikol-voda, koja se koristi kao radna tvar u sekundarnom. Razlog korištenja smjese glikol-vode je što ima slične karakteristike prijenosa topline kao i voda, međutim do smrzavanja dolazi tek pri temperaturama ispod  $-51\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Usporedba fizikalnih svojstava vode i smjese glikol-voda dana je na sljedećim slikama:

- Slika 4.2. prikazuje usporedbu specifičnih toplinskih kapaciteta
- Slika 4.3. prikazuje usporedbu gustoća

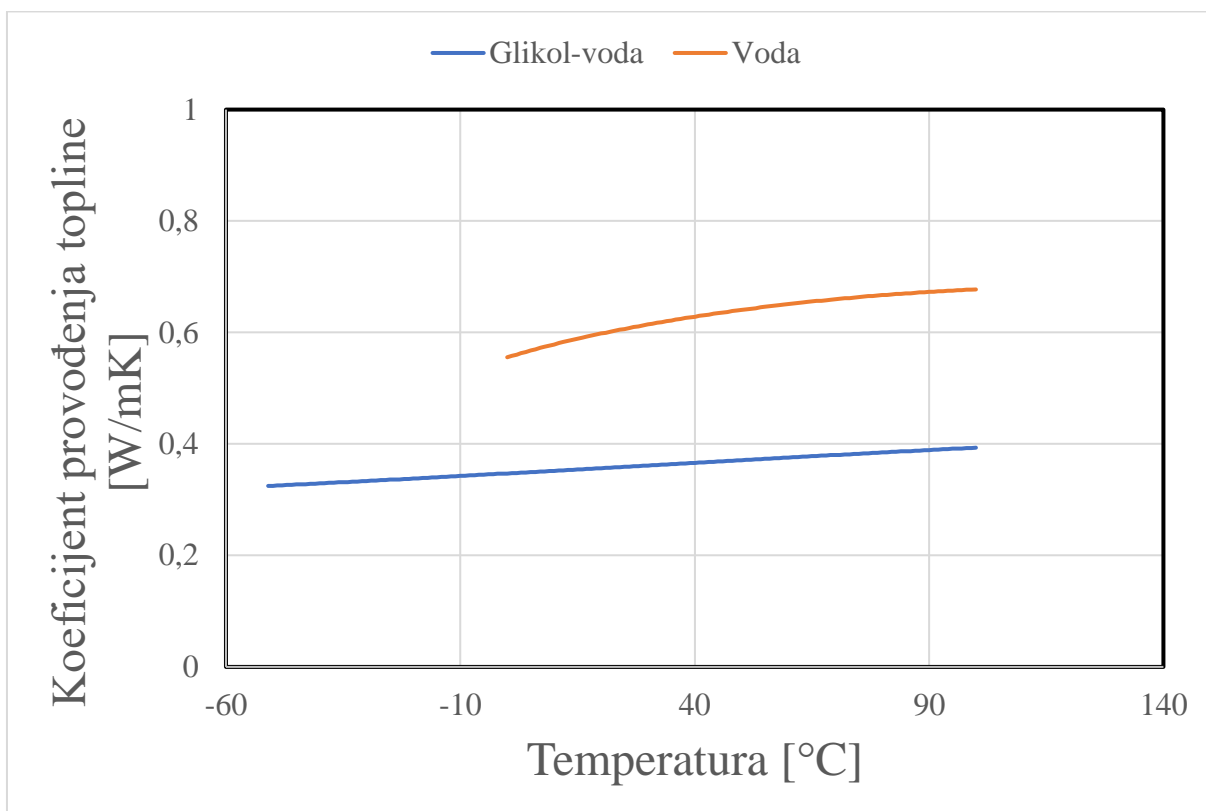
- Slika 4.4. prikazuje usporedbu koeficijenta provođenja topline
- Slika 4.5. prikazuje usporedbu dinamičkih viskoziteta



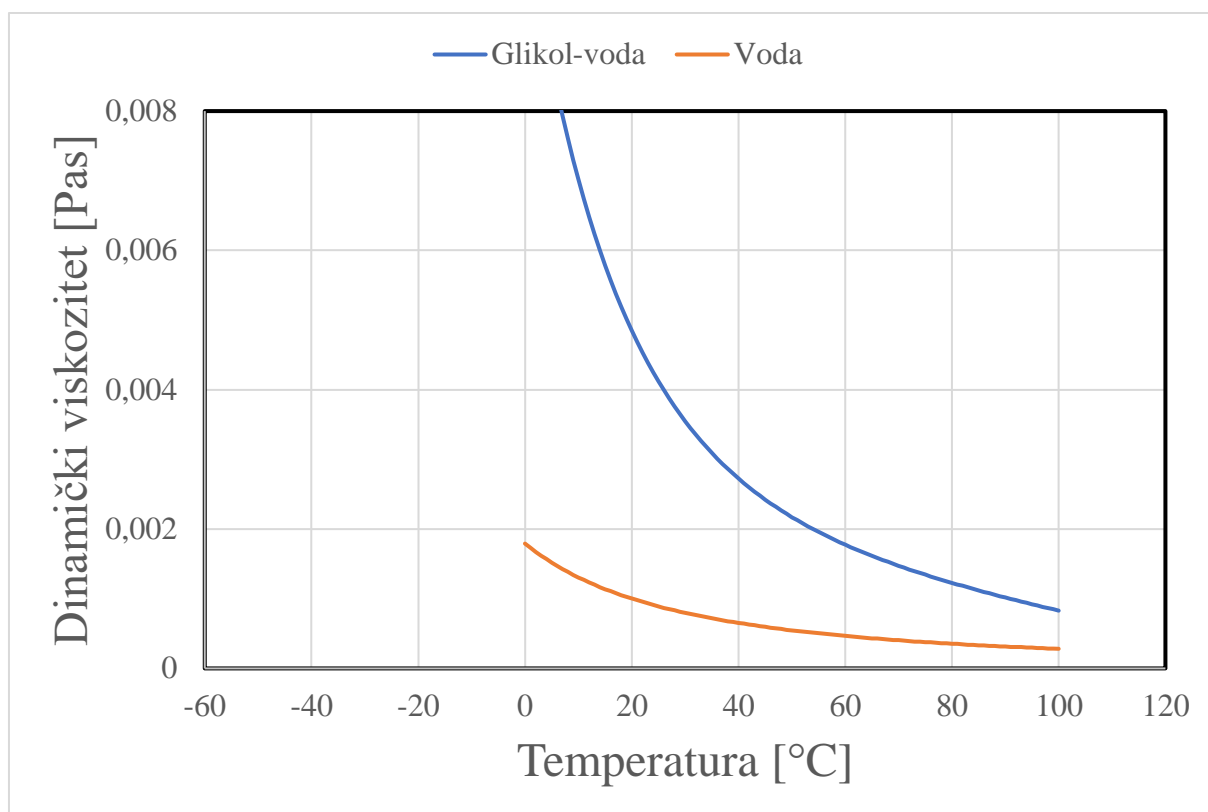
Slika 4.2. Usporedba specifičnih toplinskih kapaciteta vode i smjese glikol-voda ( $\xi = 0,6$ )



Slika 4.3. Usporedba gustoća vode i smjese glikol-voda ( $\xi = 0,6$ )



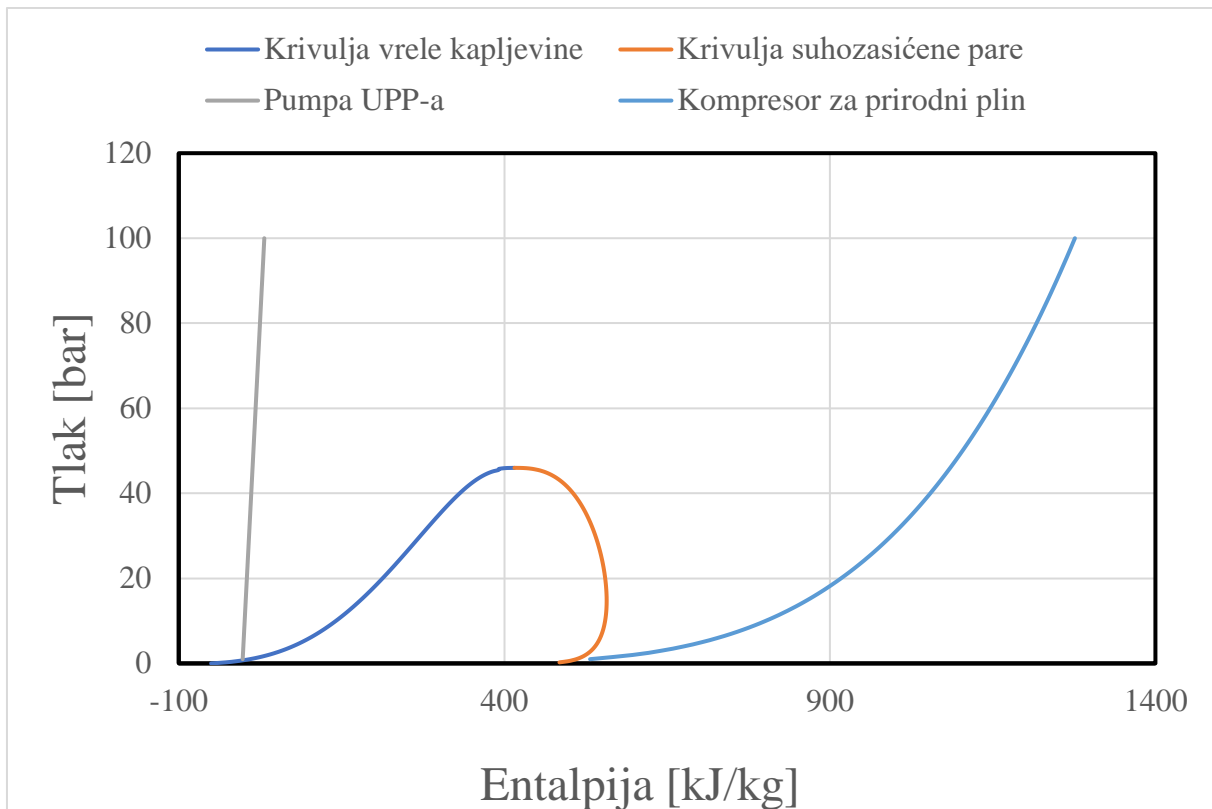
Slika 4.4. Usporedba koeficijenta provođenja topline vode i smjese glikol-voda ( $\xi = 0,6$ )



Slika 4.5. Usporedba dinamičkih viskoziteta vode i smjese glikol-voda ( $\xi = 0,6$ )

Drugi izmjenjivač topline je izmjenjivač tipa cijevi u plaštu (eng. Shell and Tube) koji se koristi za predaju topline s radne tvari (smjese glikol-voda) na ukapljeni prirodni plin. Ukapljeni prirodni plin ulazi u isparivač pri temperaturi od  $-162\text{ °C}$  i tlaku od 110 bara, a izlazi u plinovitom agregatnom stanju pri temperaturi od  $5\text{ °C}$  i tlaku od 100 bara. Radi uštede na energiji prirodni plin se tlači prije ulaska u isparivač, dok je još u kapljevitosti. Drugo moguće rješenje je da se nakon izlaska iz isparivača ugradi kompresor i u kompresoru komprimira na tlak od 100 bara. Međutim takvo rješenje iziskuje potrebu za previše energije, iz tog razloga u ovom sustavu se koristi pumpa za ukapljeni plin. Razlika u potrebnoj energiji za tlačenje vidljiva je na slici 4.6. Na slici je osim rada pumpe i kompresora prikazana krivulja vrele kapljevine i suhozasićene pare metana. Rad pumpe iznosi  $33,2\text{ kJ/kg}$ , a rad kompresije prirodnog plina  $744,4\text{ kJ/kg}$ . Prosječni satni kapacitet LNG terminala Krk iznosi  $331050\text{ m}^3/\text{h}$ , stoga je potrebna snaga pumpe za kompresiju UPP-a prije uplinjavanja  $2,2\text{ MW}$ , a potrebna snaga kompresora za kompresiju prirodnog plina nakon uplinjavanja iznosila bi  $49,1\text{ MW}$ .





Slika 4.6 p-h dijagram metana i usporedba kompresije UPP prije uplinjavanja i kompresije prirodnog plina nakon uplinjavanja

#### 4.1. Polazne postavke proračuna

Kako bi se proračuni dimenzioniranja pločastog izmjenjivača topline i izmjenjivača topline tipa cijevi u plaštu mogli provesti potrebno je postaviti polazne parametre za proračun. Poznato je da ukapljeni prirodni plin ulazi u izmjenjivač pri temperaturi od  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$  i tlaku od 110 bara pri čemu njegova entalpija iznosi 13,0213 kJ/kg. Izlaz iz isparivača se vrši pri temperaturi od  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  i tlaku od 100 bara pri čemu njegova entalpija iznosi 746,89 kJ/kg. Potrebno je izračunati promjenu entalpije kao što je prikazano u izrazu (4.1):

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 746,89 - 13,0213 = 733,87 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (4.1)$$

Gdje je:

$\Delta h$  = Promjena entalpije (kJ/kg)

$h_2$  = Entalpija prirodnog plina na izlazu iz isparivača (kJ/kg)

$h_l$  = Entalpija ukapljenog prirodnog plina na ulazu u isparivač (kJ/kg)

Nadalje, godišnji kapacitet LNG terminala Krk iznosi 2,9 Gm<sup>3</sup>/god. Jedna godina ima 365 dana, jedan dan ima 24 sata, može se doći do zaključka da jedna godina ima 8760 sati. Podijelimo li godišnji kapacitet LNG terminala u Krku sa brojem sati u godini dobit će se prosječni satni kapacitet terminala, kako je prikazano u izrazu (4.2).

$$\dot{V}_h = \frac{\dot{V}_{god}}{8760} = \frac{2,9}{8760} = 0,00033105 \frac{\text{Gm}^3}{\text{h}} = 331050 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (4.2)$$

Gdje je:

$\dot{V}_h$  = Prosječni satni kapacitet LNG terminala Krk (m<sup>3</sup>/h)

$\dot{V}_{god}$  = Godišnji kapacitet LNG terminala Krk (Gm<sup>3</sup>/god)

Pri standardnom uvjetima od 288,15 K i 101325 Pa gustoća prirodnog plina iznosi 0,6798 kg/m<sup>3</sup>. Pomnoži li se gustoća sa prosječnim satnim kapacitetom dobiva se prosječni satni kapacitet u kilogramima. Matematička operacija je prikazana u izrazu (4.3).

$$\dot{G}_h = \dot{V}_h \cdot \rho_{st} = 331050 \cdot 0,6798 = 225059,31 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (4.3)$$

Gdje je:

$\dot{G}_h$  = Prosječni satni kapacitet LNG terminala Krk u kilogramima (kg/h)

$\dot{V}_h$  = Prosječni satni kapacitet LNG terminala Krk (m<sup>3</sup>/h)

$\rho_{st}$  = Gustoća prirodnog plina pri standardnim uvjetima (kg/m<sup>3</sup>)

Maksimalni satni kapacitet je uzet kao količina plina koja je 3 puta veća od prosječnog satnog kapaciteta, matematičkim operacijama prikazano u izrazu (4.4):

$$\dot{G}_{h,maks} = 3 \cdot \dot{G}_h = 3 \cdot 225059,31 = 675177,93 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (4.4)$$

Gdje je:

$\dot{G}_{h,maks}$  = Maksimalni satni kapacitet LNG terminala Krk u kilogramima (kg/h)

$\dot{G}_h$  = Prosječni satni kapacitet LNG terminala Krk u kilogramima (kg/h)

Pošto je potrebno dobiti ukupnu toplinsku snagu izmjenjivača maksimalni satni kapacitet potrebno je pretvoriti u maksimalni kapacitet po sekundi. Jedan sat ima 60 minuta, jedna minuta ima 60 sekundi i može se doći do zaključka da 1 sat ima 3600 sekundi. Dakle, maksimalni satni kapacitet je potrebno podijeliti sa 3600 kako bi se dobio maksimalni kapacitet po sekundi, prikazano u izrazu (4.5):

$$\dot{G}_{maks} = \frac{\dot{G}_{h,maks}}{3600} = \frac{675177,93}{3600} = 187,55 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.5)$$

Gdje je:

$\dot{G}_{maks}$  = Maksimalni kapacitet LNG terminala Krk u kilogramima po sekundi (kg/s)

$\dot{G}_{h,maks}$  = Maksimalni satni kapacitet LNG terminala Krk u kilogramima (kg/h)

Konačno, da bi dobili maksimalni potrebni toplinski učin izmjenjivača, potrebno je pomnožiti promjenu entalpije izračunate u izrazu (4.1) i maksimalni kapacitet LNG terminala Krk izračunat u izrazu (4.5). Matematičke operacije prikazane su u izrazu (4.6):

$$\dot{Q} = \Delta h \cdot \dot{G}_{maks} = 733,87 \cdot 187,55 = 137637,2 \text{ kW} = 137,637 \text{ MW} \quad (4.6)$$

Gdje je:

$\dot{Q}$  = Maksimalni toplinski učin izmjenjivača (MW)

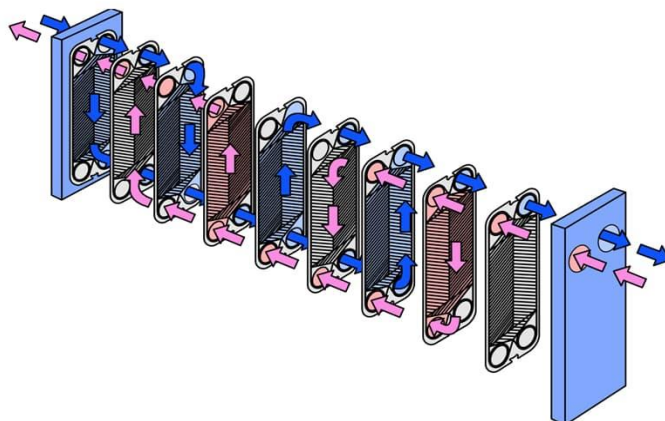
$\Delta h$  = Promjena entalpije (kJ/kg)

$\dot{G}_{maks}$  = Maksimalni kapacitet LNG terminala Krk u kilogramima po sekundi (kg/s)

Dobiveni toplinski učin odnosi se na izmjenjivač tipa cijevi u plaštu u kojem se uplinjava ukapljeni prirodni plin putem radne tvari glikol-voda. Međutim, kako bi se bilanca energije zadovoljila pločasti izmjenjivač koji prebacuje toplinu između morske vode i glikol-vode mora imati jednaki toplinski učin.

#### 4.2. Proračun pločastog izmjenjivača topline

U pločastom izmjenjivaču topline vrši se prijelaz topline sa morske vode na radnu tvar procesa uplinjavanja, tj. na smjesu glikol-voda. Shematski prikaz strujanja fluida unutar pločastog izmjenjivača topline prikazan je na slici 4.7.



Slika 4.7. Shematski prikaz strujanja fluida unutar pločastog izmjenjivača topline

Potrebni toplinski učin izmjenjivača, izračunat u izrazu (4.6), iznosi 137,637 MW. U prvom koraku proračuna potrebno je odrediti ulazne i izlazne temperature obje struje u izmjenjivaču. Kao ulazna temperatura mora uzeta je prosječna temperatura mora za Krk od 14 °C, a izlazna temperatura mora postavljena je na 7 °C. Ulazna temperatura smjese glikol-voda iznosi 0 °C, a izlazna temperatura postavljena je na 10 °C. Fizikalna svojstva fluida računaju se za aritmetičku srednju temperaturu između ulaznih i izlaznih temperatura isparivača. Za morsku vodu srednja temperatura iznosi 10,5 °C a za smjesu glikol-voda 5 °C. Fizikalna svojstva za morsku vodu prikazana su u tablici 4.1., a za smjesu glikol voda u tablici 4.2.

Tablica 4.1. Fizikalna svojstva morske vode

| Fizikalna svojstva morske vode         |          |
|--|----------|
| Temperatura [°C]                       | 10,5     |
| Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]           | 999,6091 |
| Dinamička viskoznost [Pas]             | 0,001287 |
| Koeficijent provođenja topline [W/mK]  | 0,579755 |
| Specifični toplinski kapacitet [J/kgK] | 4194,739 |

Tablica 4.2. Fizikalna svojstva smjese glikol-voda

| Fizikalna svojstva smjese glikol-voda  |          |
|--|----------|
| Temperatura [°C]                       | 5        |
| Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]           | 1085,369 |
| Dinamička viskoznost [Pas]             | 0,008649 |
| Koeficijent provođenja topline [W/mK]  | 0,349534 |
| Specifični toplinski kapacitet [J/kgK] | 3000,565 |

Nadalje, potrebno je odrediti masene protoke obje struje.

Maseni protok dobije se na način da se maksimalni toplinski učin izmjenjivača (izraz (4.6)) podijeli sa umnoškom specifičnog toplinskog kapaciteta i razlike temperatura na ulazu i izlazu iz isparivača, matematički zapisano u izrazu (4.7):

$$\dot{G}_w = \frac{\dot{Q}}{c_w \cdot (t_{w1} - t_{w2})} = \frac{137637,2}{4,1947 \cdot (14 - 7)} = 4687,41 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.7)$$

Gdje je:

$\dot{G}_w$  = maseni protok morske vode u izmjenjivaču (kg/s)

$\dot{Q}$  = Maksimalni toplinski učin izmjenjivača (kW)

$c_w$  = specifični toplinski kapacitet morske vode (kJ/kgK)

$t_{w1}$  = temperatura morske vode na ulazu u izmjenjivač (°C)

$t_{w2}$  = temperatura morske vode na izlazu iz izmjenjivača (°C)

Jednakim postupkom dobije se i maseni protok smjese glikol-voda, matematički zapisano u izrazu (4.8):

$$\dot{G}_g = \frac{\dot{Q}}{c_g \cdot (t_{g2} - t_{g1})} = \frac{137637,2}{3 \cdot (10 - 0)} = 4587,04 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.8)$$

Gdje je:

$\dot{G}_g$  = maseni protok smjese glikol-voda u izmjenjivaču (kg/s)

$\dot{Q}$  = Maksimalni toplinski učin izmjenjivača (MW)

$c_g$  = specifični toplinski smjese glikol-voda (kJ/kgK)

$t_{g1}$  = temperatura smjese glikol-voda na ulazu u izmjenjivač (°C)

$t_{g2}$  = temperatura smjese glikol-voda na izlazu iz izmjenjivača (°C)

Volumni protok dobije se dijeljenjem masenog protoka i gustoće radnog medija, izraz (4.9) vrijedi za morsku vodu, a izraz (4.10) za smjesu glikol–voda:

$$\dot{V}_w = \frac{\dot{G}_w}{\rho_w} = \frac{4687,41}{999,6091} = 4,689 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (4.9)$$

Gdje je:

$\dot{V}_w$  = Volumni protok morske vode (m<sup>3</sup>/s)

$\dot{G}_w$  = maseni protok morske vode u izmjenjivaču (kg/s)

$\rho_w$  = gustoća morske vode (kg/m<sup>3</sup>)

$$\dot{V}_g = \frac{\dot{G}_g}{\rho_g} = \frac{4587,043}{1085,369} = 4,226 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (4.10)$$

Gdje je:

$\dot{V}_g$  = Volumni protok smjese glikol-voda (m<sup>3</sup>/s)

$\dot{G}_g$  = maseni protok smjese glikol-voda izmjenjivaču (kg/s)

$\rho_g$  = gustoća smjese glikol voda (kg/m<sup>3</sup>)

Nakon određivanja masenih protoka morske vode i glikol-vode, sljedeći koraci služe da bi se odredila veličina površine izmjene topline u pločastom izmjenjivaču i snaga pumpi za obje struje. Prije početka računanja potrebno je odrediti sljedeće parametre za pločasti izmjenjivač topline:

- Maksimalnu brzinu strujanja morske vode između ploča  $w_{w,maks} = 1 \text{ m/s}$ ,
- maksimalnu brzinu strujanja smjese glikol-voda između ploča  $w_{g,maks} = 1 \text{ m/s}$ ,
- visinu ploče  $a = 4 \text{ m}$ ,

- širinu ploče  $b = 4$  m,
- debljinu ploče  $d = 0,001$  m,
- razmak između dvije ploče  $t = 0,0026$  m.

Kada su svi navedeni parametri određeni može se započeti sa dimenzioniranjem izmjenjivača. Potrebno je obratiti pozornost da dobiveni broj ploča (broj kanala) u izmjenjivaču topline zadovoljava uvjet maksimalne brzine strujanja, ali i da je izmjenjivač dovoljno velik da zadovolji potrebnu površinu izmjene topline.

Sljedeći koraci proračuna predstavljaju dimenzioniranje pločastog izmjenjivača s obzirom na maksimalno dozvoljenu brzinu strujanja.

Izračun za potreban broj kanala za postizanje brzine manje od maksimalne za morsku vodu i smjesu glikol-voda prikazani su izrazima (4.11) i (4.12).

$$n_{wk,pr} = \frac{\dot{V}_w}{w_{w,maks} \cdot b \cdot t} = \frac{4,689}{1 \cdot 4 \cdot 0,0026} = 450,88 \quad (4.11)$$

Gdje je:

$n_{wk,pr}$  = proračunski broj kanala s obzirom na uvjet maksimalne brzine

$\dot{V}_w$  = Volumni protok morske vode ( $m^3/s$ )

$b$  = širina ploče (m)

$t$  = razmak između 2 ploče (m)

$w_{w,maks}$  = maksimalna brzina nastrujavanja vode na ploču (m/s)

$$n_{gk,pr} = \frac{\dot{V}_g}{w_{g,maks} \cdot b \cdot t} = \frac{4,226}{1 \cdot 4 \cdot 0,0026} = 406,37 \quad (4.12)$$

Gdje je:

$n_{gk,pr}$  = proračunski broj kanala

$\dot{V}_g$  = Volumni protok smjese glikol-voda ( $m^3/s$ )

$b$  = širina ploče (m)

$t$  = razmak između 2 ploče (m)

$w_{g,maks}$  = maksimalna brzina nastrujavanja smjese glikol-voda na ploču (m/s)

Iz broja kanala može se dobiti potreban broj ploča za postizanje brzine manje od maksimalne. U izrazu (4.13) izračunat je potreban broj ploča za morsku vodu, a u izrazu (4.14) za smjesu glikol-voda.

$$n_{wpl,pr} = 2 \cdot n_{wk,pr} + 1 = 2 \cdot 450,88 + 1 = 902,78 \quad (4.13)$$

Gdje je:

$n_{wpl,pr}$  = proračunski broj ploča s obzirom na uvjet maksimalne brzine

$n_{wk,pr}$  = proračunski broj kanala s obzirom na uvjet maksimalne brzine

$$n_{gpl,pr} = 2 \cdot n_{gk,pr} + 1 = 2 \cdot 406,37 + 1 = 813,741 \quad (4.14)$$

Gdje je:

$n_{gpl,pr}$  = proračunski broj ploča s obzirom na uvjet maksimalne brzine

$n_{gk,pr}$  = proračunski broj kanala s obzirom na uvjet maksimalne brzine

Na temelju proračuna, da bi se uvjet maksimalne brzine zadovoljio, broj ploča u izmjenjivaču mora biti veći ili jednak od 903 ploče. Odabrani broj ploča je  $n_{pl}=911$ , odabran je prvi sljedeći standardizirani broj ploča od minimalno dozvoljenog broja.

Na temelju stvarnog broja ploča, može se doći i do stvarnog broja kanala za svaku od dviju struja fluida, izračunato u izrazu (4.15).

$$n_k = \frac{n_{pl} - 1}{2} = \frac{911 - 1}{2} = 455 \quad (4.15)$$

Gdje je:

$n_k$  = stvarni broj kanala

$n_{pl}$  = odabrani broj ploča

Nadalje, potrebno je izračunati i stvarne brzine strujanja fluida. Izračun za vodu prikazan je izrazom (4.16), a za smjesu glikol-voda izrazom (4.17).



$$w_w = \frac{\dot{V}_w}{n_k \cdot b \cdot t} = \frac{4,689}{455 \cdot 4 \cdot 0,0026} = 0,991 \frac{m}{s} \quad (4.16)$$

Gdje je:

$w_w$  = stvarna brzina vode (m/s)

$\dot{V}_w$  = Volumni protok morske vode (m<sup>3</sup>/s)

$n_k$  = stvarni broj kanala

$b$  = širina ploče (m)

$t$  = razmak između 2 ploče (m)

$$w_g = \frac{\dot{V}_g}{n_k \cdot b \cdot t} = \frac{4,226}{455 \cdot 4 \cdot 0,0026} = 0,893 \frac{m}{s} \quad (4.17)$$

Gdje je:

$w_g$  = stvarna brzina smjese glikol-voda (m/s)

$\dot{V}_g$  = Volumni protok smjese glikol-voda (m<sup>3</sup>/s)

$n_k$  = stvarni broj kanala

$b$  = širina ploče (m)

$t$  = razmak između 2 ploče (m)

Sa dobivenim stvarnim brzinama strujanja završava se dio proračuna za dimenzioniranje pločastog izmjenjivača topline s obzirom na uvjet maksimalne brzine.

Daljnji koraci proračuna koriste se za izračun potrebne snage pumpe.

Proračun započinje sa izračunom gustoće masenog protoka u kanalu. U izrazu (4.18) prikazan je postupak računanja za morsku vodu, a u izrazu (4.19) za smjesu glikol-voda.

$$g_w = \frac{\dot{G}_w}{n_k \cdot b \cdot t} = \frac{4687,41}{455 \cdot 4 \cdot 0,0026} = 990,577 \frac{kg}{m^2s} \quad (4.18)$$

Gdje je:

$g_w$  = Gustoća masenog protoka morske vode u kanalu (kg/m<sup>2</sup>s)

$\dot{G}_w$  = maseni protok morske vode u izmjenjivaču (kg/s)

$n_k$  = stvarni broj kanala

$b$  = širina ploče (m)

$t$  = razmak između 2 ploče (m)

$$g_g = \frac{\dot{G}_g}{n_k \cdot b \cdot t} = \frac{4587,043}{455 \cdot 4 \cdot 0,0026} = 969,367 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} \quad (4.19)$$

Gdje je:

$g_g$  = Gustoća masenog protoka smjese glikol-voda u kanalu (kg/m<sup>2</sup>s)

$\dot{G}_g$  = maseni protok smjese glikol-voda u izmjenjivaču (kg/s)

$n_k$  = stvarni broj kanala

$b$  = širina ploče (m)

$t$  = razmak između 2 ploče (m)

Nakon gustoće masenog protoka potrebno je pretpostaviti bezdimenzijski parametar gofriranja  $X = 1$  potreban za izračun koeficijenta trenja te posljedično i pada tlaka u izmjenjivaču.

U izrazu (4.20) prikazan je izračun za omjer razvijene i projicirane površine valovite ploče.

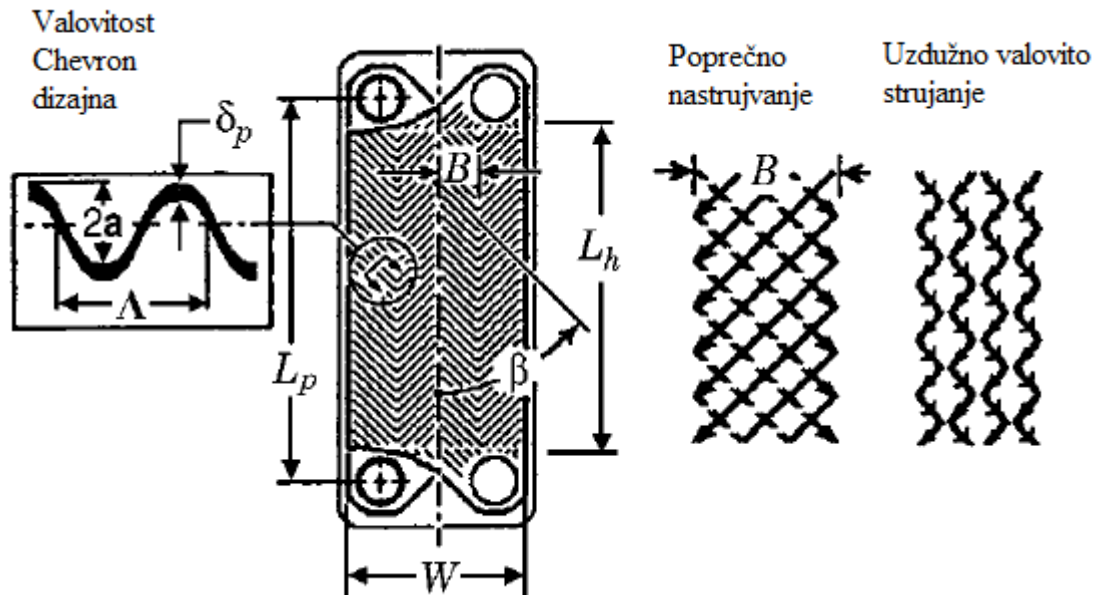
$$\Phi = \frac{1}{6} \left( 1 + \sqrt{1 + X^2} + 4 \cdot \sqrt{1 + \frac{X^2}{2}} \right) = \frac{1 + \sqrt{2} + 4 \cdot \sqrt{1,5}}{6} = 1,2189 \quad (4.20)$$

Gdje je:

$\Phi$  = Omjer razvijene i projicirane površine valovite ploče

$X$  = Bezdimenzijski parametar gofriranja ( $X = 2\pi \cdot a/\lambda$ , slika 4.8.)

Kut gofriranja  $\beta = 20^\circ$  potrebno je pretpostaviti tako da se dobije najbolji rezultat. Na slici 4.8. prikazana je valovita ploča („chevron“ uzorak) koja se koristi u ovakvoj vrsti pločastog izmjenjivača topline.



Slika 4.8. Prikaz ploče sa „Chevron“ dizajnom [11]

Slijedi računanje hidrauličkog promjera prikazano u izrazu (4.21).

$$D_h = \frac{2 \cdot t}{\Phi} = \frac{2 \cdot 0,0026}{1,2189} = 0,004266 \text{ m} \quad (4.21)$$

Gdje je:

$D_h$  = hidraulički promjer (m)

$t$  = razmak između 2 ploče (m)

$\Phi$  = Omjer razvijene i projicirane površine valovite ploče

Da bi se mogao izračunati koeficijent trenja potrebno je prvo odrediti bezdimenzijske značajke za morsku vodu i smjesu glikol voda. Redom su izrazima prikazani izračuni za bezdimenzijsku Reynoldsovu značajku za morsku vodu (4.22) i smjesu glikol-voda (4.23), te za Prandtlovu bezdimenzijsku značajku za morsku vodu (4.24) i smjesu glikol-voda (4.25).

$$Re_w = \frac{g_w \cdot D_h}{\eta_w} = \frac{990,577 \cdot 0,004266}{0,001287} = 3282,624 \quad (4.22)$$

Gdje je:

$Re_w$  = Reynoldsova bezdimenzijska značajka za morsku vodu

$g_w$  = Gustoća masenog protoka morske vode u kanalu ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ )

$D_h$  = hidraulički promjer (m)

$\eta_w$  = Dinamička viskoznost morske vode (Pas)

$$Re_g = \frac{g_g \cdot D_h}{\eta_g} = \frac{969,367 \cdot 0,004266}{0,00865} = 478,171 \quad (4.23)$$

Gdje je:

$Re_g$  = Reynoldsova bezdimenzijska značajka

$g_g$  = Gustoća masenog protoka smjese glikol-voda u kanalu ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ )

$D_h$  = hidraulički promjer (m)

$\eta_g$  = Dinamička viskoznost smjese glikol-voda (Pas)

$$Pr_w = \frac{\eta_w \cdot c_w}{\lambda_w} = \frac{0,001287 \cdot 4194,74}{0,5798} = 9,315 \quad (4.24)$$

Gdje je:

$Pr_w$  = Prandtlova bezdimenzijska značajka za morsku vodu

$\eta_w$  = Dinamička viskoznost morske vode (Pas)

$c_w$  = specifični toplinski kapacitet morske vode ( $\text{J/kgK}$ )

$\lambda_w$  = koeficijent provođenja topline morske vode ( $\text{W/mK}$ )

$$Pr_g = \frac{\eta_g \cdot c_g}{\lambda_g} = \frac{0,008649 \cdot 3000,57}{0,3495} = 74,245 \quad (4.25)$$

Gdje je:

$Pr_g$  = Prandtlova bezdimenzijska značajka smjese glikol-voda

$\eta_g$  = Dinamička viskoznost smjese glikol-voda (Pas)

$c_g$  = specifični toplinski kapacitet smjese glikol-voda ( $\text{J/kgK}$ )

$\lambda_g$  = koeficijent provođenja topline smjese glikol-voda ( $\text{W/mK}$ )

Sada je omogućeno računanje faktora  $f_0$  i  $f_1$  potrebnih za izračun koeficijenta trenja. S obzirom da je strujanje vode u pločastom izmjenjivaču topline turbulentno ( $Re_w > 2000$ ), a strujanje smjese glikol-voda laminarno ( $Re_g < 2000$ ) koristit će se odgovarajući izrazi za izračun faktora trenja turbulentnog strujanja (voda) i za faktore trenja laminarnog strujanja (glikol-voda). Izrazima (4.26) i (4.27) prikazani su izračuni faktora  $f_0$  i  $f_1$  za morsku vodu.[11]

$$f_{0w} = (1,56 \cdot \ln Re_w - 3,0)^{-2} = (1,56 \cdot \ln 3282,624 - 3)^{-2} = 0,0108 \quad (4.26)$$

Gdje je:

$f_{0w}$  = faktor  $f_0$  za morsku vodu

$Re_w$  = Reynoldsova bezdimenzijska značajka za morsku vodu

$$f_{1w} = \frac{9,75}{Re_w^{0,289}} = \frac{9,75}{3282,624^{0,289}} = 0,94 \quad (4.27)$$

Gdje je:

$f_{1w}$  = faktor  $f_1$  za morsku vodu

$Re_w$  = Reynoldsova bezdimenzijska značajka za morsku vodu

Računanje faktora  $f_0$  i  $f_1$  za smjesu glikol-voda (kad je  $Re_g$  manji od 2000) prikazano je izrazima (4.28) i (4.29).

$$f_{0g} = \frac{16}{Re_g} = \frac{16}{478,171} = 0,0335 \quad (4.28)$$

Gdje je:

$f_{0g}$  = faktor  $f_0$  za smjesu glikol-voda

$Re_g$  = Reynoldsova bezdimenzijska značajka za smjesu glikol-voda

$$f_{1g} = \frac{149,25}{Re_g} + 0,9625 = \frac{149,25}{478,171} + 0,9625 = 1,27 \quad (4.29)$$

Gdje je:

$f_{1g}$  = faktor  $f_1$  za smjesu glikol-voda

$Re_g$  = Reynoldsova bezdimenzijska značajka za smjesu glikol-voda

Konačno, može se izračunati i Fanningov faktor trenja za morsku vodu i za smjesu glikol-voda. Izračun za morsku vodu prikazan je u izrazu (4.30), a za smjesu glikol-voda u izrazu (4.31).

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{f_w}} &= \frac{\cos \beta}{\sqrt{(0,045 \cdot \tan \beta + 0,09 \cdot \sin \beta + \frac{f_{0w}}{\cos \beta})}} + \frac{1 - \cos \beta}{\sqrt{3,8 \cdot f_{1w}}} \\ &= \frac{\cos 20^\circ}{\sqrt{(0,045 \cdot \tan 20^\circ + 0,09 \cdot \sin 20^\circ + \frac{0,0108}{\cos 20^\circ})}} + \frac{1 - \cos 20^\circ}{\sqrt{3,8 \cdot 0,94}} = 3,91 \\ f_w &= \left( \frac{1}{\sqrt{f_w}} \right)^{-2} = 3,91^{-2} = 0,06532 \end{aligned} \quad (4.30)$$

Gdje je:

$f_w$  = Fanningov faktor trenja za morsku vodu

$\beta$  = kut gofriranja ( $^\circ$ ), pretpostavljeno  $\beta = 20^\circ$

$f_{0w}$  = faktor  $f_0$  za morsku vodu

$f_{1w}$  = faktor  $f_1$  za morsku vodu

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{f_g}} &= \frac{\cos \beta}{\sqrt{(0,045 \cdot \tan \beta + 0,09 \cdot \sin \beta + \frac{f_{0g}}{\cos \beta})}} + \frac{1 - \cos \beta}{\sqrt{3,8 \cdot f_{1g}}} \\ &= \frac{\cos 20^\circ}{\sqrt{(0,045 \cdot \tan 20^\circ + 0,09 \cdot \sin 20^\circ + \frac{0,0335}{\cos 20^\circ})}} + \frac{1 - \cos 20^\circ}{\sqrt{3,8 \cdot 1,27}} = 3,29 \\ f_g &= \left( \frac{1}{\sqrt{f_g}} \right)^{-2} = 3,29^{-2} = 0,09218 \end{aligned} \quad (4.31)$$

Gdje je:

$f_g$  = Fanningov faktor trenja za smjesu glikol-voda

$\beta$  = kut gofriranja ( $^\circ$ ), pretpostavljeno  $\beta = 20^\circ$

$f_{0g}$  = faktor  $f_0$  za smjesu glikol-voda

$f_{1g}$  = faktor  $f_1$  za smjesu glikol-voda

Nakon što se dobije Fanningov faktor trenja može se izračunati pad tlaka u izmjenjivaču za morsku vodu i smjesu glikol-voda. Izračun za morsku vodu prikazan je u izrazu (4.32), a za smjesu glikol-voda u izrazu (4.33).

$$\Delta p_w = \frac{2 \cdot a \cdot \rho_w \cdot f_w \cdot w_w^2}{D_h} = \frac{2 \cdot 4 \cdot 999,61 \cdot 0,06532 \cdot 0,991^2}{0,004266} = 120242,18 \text{ Pa} \quad (4.32)$$

Gdje je:

$\Delta p_w$  = pad tlaka u izmjenjivaču za morsku vodu (Pa)

$a$  = visina ploče (m)

$\rho_w$  = gustoća morske vode ( $\text{kg/m}^3$ )

$f_w$  = Fanningov faktor trenja za morsku vodu

$w_w$  = stvarna brzina vode (m/s)

$D_h$  = hidraulički promjer (m)

$$\Delta p_g = \frac{2 \cdot a \cdot \rho_g \cdot f_g \cdot w_g^2}{D_h} = \frac{2 \cdot 4 \cdot 1085,37 \cdot 0,09218 \cdot 0,893^2}{0,004266} = 149650,95 \text{ Pa} \quad (4.33)$$

Gdje je:

$\Delta p_g$  = pad tlaka u izmjenjivaču za smjesu glikol-voda (Pa)

$a$  = visina ploče (m)

$\rho_g$  = gustoća smjese glikol-voda ( $\text{kg/m}^3$ )

$f_g$  = Fanningov faktor trenja za smjesu glikol-voda

$w_g$  = stvarna brzina smjese glikol-voda (m/s)

$D_h$  = hidraulički promjer (m)

Izračun snage pumpe za morsku vodu prikazan je u izrazu (4.34), a za smjesu glikol-voda u izrazu (4.35).

$$P_w = \frac{\Delta p_w \cdot \dot{V}_w}{0,7} = \frac{120242,18 \cdot 4,689}{0,7} = 805492,322 \text{ W} \quad (4.34)$$

Gdje je:

$P_w$  = potrebna snaga pumpe za morsku vodu (W)

$\Delta p_w$  = pad tlaka u izmjenjivaču za morsku vodu (Pa)

$\dot{V}_w$  = Volumni protok morske vode ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$$P_g = \frac{\Delta p_g \cdot \dot{V}_g}{0,7} = \frac{149650,947 \cdot 4,226}{0,7} = 903518,235 \text{ W} \quad (4.35)$$

Gdje je:

$P_g$  = potrebna snaga pumpe za smjesu glikol-voda (W)

$\Delta p_g$  = pad tlaka u izmjenjivaču za smjesu glikol-voda (Pa)

$\dot{V}_g$  = Volumni protok smjese glikol-voda ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

Potrebno je provjeriti odgovaraju li dimenzije izmjenjivača minimalno potrebnoj površini izmjene topline.

Kako bi se mogla dobiti minimalna površina izmjene topline prvo je potrebno odrediti koeficijent prolaza topline, Prolaz topline definira se kao prijelaz topline sa fluida na krutu stijenu, zatim provođenje topline kroz tu stijenu i potom opet prijelaz topline sa krute stijene na fluid, što znači da je za izračun koeficijenta prolaza topline prvo potrebno odrediti koeficijente prijelaza topline.

Za određivanje koeficijenata prijelaza topline potrebno je odrediti bezdimenzijsku Nusseltovu značajku. Izračun bezdimenzijska Nusseltove značajke za morsku vodu prikazan je u izrazu (4.36), a za smjesu glikol-voda u izrazu (4.37).



$$\begin{aligned}
Nu_w &= 0,205 \cdot Pr_w^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\eta_w}{\eta_w}\right)^{\frac{1}{6}} \cdot (f_w \cdot Re_w^2 \cdot \sin 2\beta)^{0,374} \\
&= 0,205 \cdot 9,315^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{0,001287}{0,001287}\right)^{\frac{1}{6}} \cdot (0,0653 \cdot 3282,62^2 \cdot \sin(2 \cdot 20))^{0,374} \\
&= 56,234
\end{aligned} \tag{4.36}$$

Gdje je:

$Nu_w$  = Nusseltova bezdimenzijska značajka za morsku vodu

$Pr_w$  = Prandtlova bezdimenzijska značajka za morsku vodu

$\eta_w$  = Dinamička viskoznost morske vode (Pas)

$f_w$  = Fanningov faktor trenja za morsku vodu

$Re_w$  = Reynoldsova bezdimenzijska značajka za morsku vodu

$\beta$  = kut gofriranja (°)

$$\begin{aligned}
Nu_g &= 0,205 \cdot Pr_g^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\eta_g}{\eta_w}\right)^{\frac{1}{6}} \cdot (f_g \cdot Re_g^2 \cdot \sin 2\beta)^{0,374} \\
&= 0,205 \cdot 74,245^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{0,008649}{0,001287}\right)^{\frac{1}{6}} \cdot (0,09218 \cdot 478,171^2 \cdot \sin(2 \cdot 20))^{0,374} \\
&= 30,243
\end{aligned} \tag{4.37}$$

Gdje je:

$Nu_g$  = Nusseltova bezdimenzijska značajka za smjesu glikol-voda

$Pr_g$  = Prandtlova bezdimenzijska značajka za smjesu glikol-voda

$\eta_w$  = Dinamička viskoznost morske vode (Pas)

$\eta_g$  = Dinamička viskoznost smjese glikol-voda (Pas)

$f_g$  = Fanningov faktor trenja za smjesu glikol-voda

$Re_g$  = Reynoldsova bezdimenzijska značajka za smjesu glikol-voda

$\beta$  = kut gofriranja (°)

Koeficijent prijelaza topline za morsku vodu izračunat je u izrazu (4.38), a za smjesu glikol voda u izrazu (4.39).

$$\alpha_w = \frac{Nu_w \cdot \lambda_w}{D_h} = \frac{56,234 \cdot 0,5798}{0,004266} = 7641,8 \frac{W}{m^2K} \quad (4.38)$$

Gdje je:

$\alpha_w$  = koeficijent prijelaza topline morske vode (W/m<sup>2</sup>K)

$Nu_w$  = Nusseltova bezdimenzijska značajka za morsku vodu

$\lambda_w$  = koeficijent provođenja topline morske vode (W/mK)

$D_h$  = hidraulički promjer (m)

$$\alpha_g = \frac{Nu_g \cdot \lambda_g}{D_h} = \frac{30,243 \cdot 0,3495}{0,004266} = 2477,83 \frac{W}{m^2K} \quad (4.39)$$

Gdje je:

$\alpha_g$  = koeficijent prijelaza topline smjese glikol-voda (W/m<sup>2</sup>K)

$Nu_g$  = Nusseltova bezdimenzijska značajka za smjesu glikol-voda

$\lambda_g$  = koeficijent provođenja topline smjese glikol-voda (W/mK)

$D_h$  = hidraulički promjer (m)

Slijedi izračun koeficijenta prolaza topline prikazan u izrazu (4.40).

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w} + \frac{d}{\lambda_a} + \frac{1}{\alpha_g}} = \frac{1}{\frac{1}{7641,8} + \frac{0,001}{104,67} + \frac{1}{2477,83}} = 1838,261 \frac{W}{m^2K} \quad (4.40)$$

Gdje je:

$k$  = koeficijent prolaza topline (W/m<sup>2</sup>K)

$\alpha_w$  = koeficijent prijelaza topline morske vode (W/m<sup>2</sup>K)

$d$  = debljina jedne ploče (m)

$\lambda_a$  = koeficijent provođenja topline aluminij slitine (W/mK)

$\alpha_g$  = koeficijent prijelaza topline smjese glikol-voda (W/m<sup>2</sup>K)

Prije nego se prijeđe na izračun potrebne površine izmjene topline potrebno je izračunati srednju logaritamska razlika temperatura. Izračun je prikazan u izrazu (4.41).

$$\begin{aligned}\Delta T &= \frac{\Delta T' - \Delta T''}{\ln \frac{\Delta T'}{\Delta T''}} = \frac{(T_w'' - T_g') - (T_w' - T_g'')}{\ln \frac{(T_w'' - T_g')}{(T_w' - T_g'')}} = \frac{(280,15 - 273,15) - (287,15 - 283,15)}{\ln \frac{(280,15 - 273,15)}{(287,15 - 283,15)}} \\ &= \frac{7 - 4}{\ln \frac{7}{4}} = 5,361 \text{ K}\end{aligned}\quad (4.41)$$

Gdje je:

$\Delta T$  = srednja logaritamska razlika temperatura (K)

$T_w'$  = temperatura morske vode na ulazu u izmjenjivač (K)

$T_w''$  = temperatura morske vode na izlazu iz izmjenjivača (K)

$T_g'$  = temperatura smjese glikol-voda na ulazu u izmjenjivač (K)

$T_g''$  = temperature smjesse glikol-voda na izlazu iz izmjenjivača (K)

Izračun potrebne površine izmjene topline prikazan je u izrazu (4.42).

$$A = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta T} = \frac{137637203,2}{1838,261 \cdot 5,36} = 13966,82 \text{ m}^2 \quad (4.42)$$

Gdje je:

$A$  = potrebna površina izmjene topline (m<sup>2</sup>)

$\dot{Q}$  = maksimalni toplinski učin izmjenjivača (W)

$k$  = koeficijent prolaza topline (W/m<sup>2</sup>K)

$\Delta T$  = srednja logaritamska razlika temperatura (K)

I na kraju je potrebno provjeriti koliki broj ploča je potreban s obzirom na potrebnu površinu izmjene topline. Izračun je prikazan u izrazu (4.43).

$$n_{pl,top} = \frac{A}{a \cdot b} = \frac{13966,82}{4 \cdot 4} = 872,93 \quad (4.43)$$

Gdje je:

$n_{pl,top}$  = potreban broj ploča s obzirom na potrebnu izmjenu topline

$A$  = potrebna površina izmjene topline (m<sup>2</sup>)

$a$  = visina ploče (m)

$b$  = širina ploče (m)

Pošto je potreban broj ploča s obzirom na potrebnu površinu izmjene topline manji od već odabranog broja ploča proračun zadovoljava sve uvjete i dimenzioniranje izmjenjivača je time završeno. Za upotpuniti dimenzioniranje potrebno je još izračunati duljinu pločastog izmjenjivača topline prikazano izrazom (4.43).

$$L = 2 \cdot n_k \cdot t + n_{pl} \cdot d = 2 \cdot 455 \cdot 0,0026 + 911 \cdot 0,001 = 3,277 \text{ m}$$

Gdje je:

$L$  = duljina pločastog izmjenjivača topline (m)

$n_{pl}$  = odabrani broj ploča

$t$  = razmak između 2 ploče (m)

$n_k$  = stvarni broj kanala

$d$  = debljina ploče (m)

Dimenzije pločastog izmjenjivača su:  $a \times b \times L = 4 \times 4 \times 3,277 \text{ m}$

#### 4.2.1. Analiza dobivenih rezultata

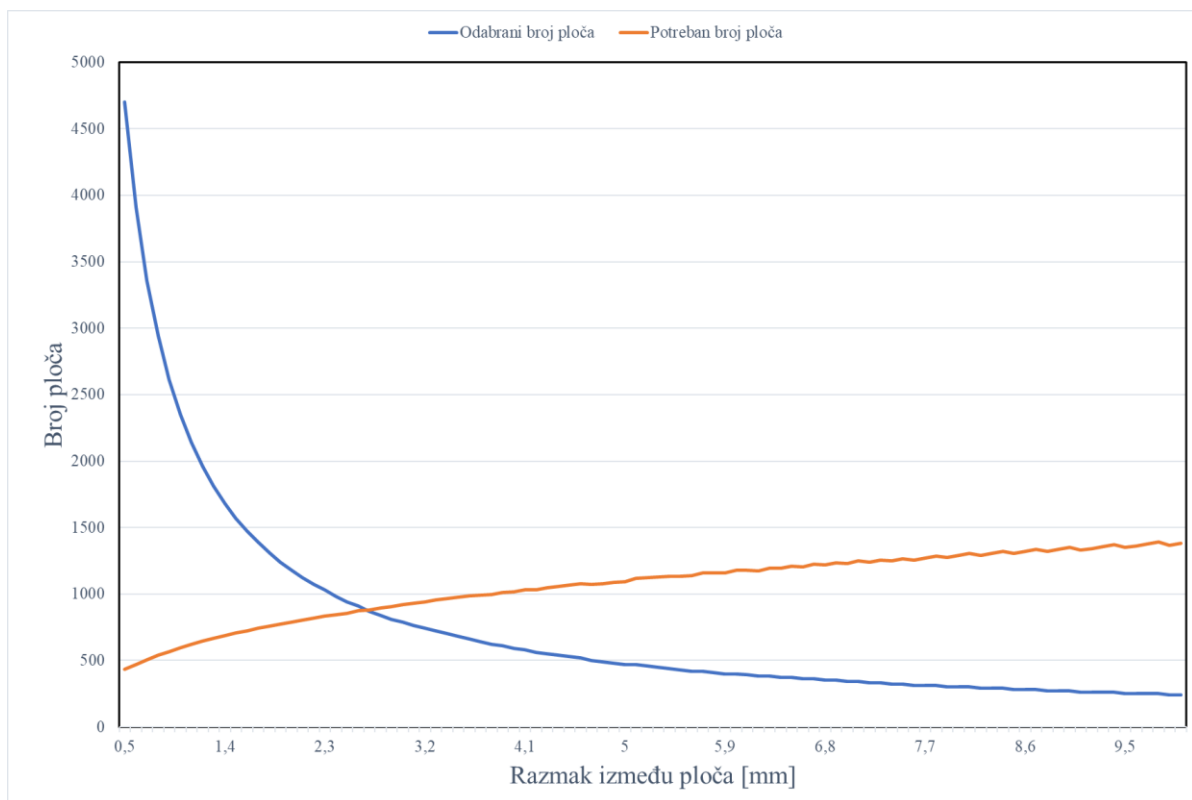
Analiza se provodila za utjecaj širine razmaka među pločama i za utjecaj kuta gofriranja.

Za širinu razmaka među pločama promatralo se kako to utječe na rad i dimenzije izmjenjivača.

Analiza se provodila na način da se proračun proveo za razmake od 0,5 do 10 mm. Mijenjali su

se jedino parametri na koje utječe razmak između ploča dok su ostali parametri bili konstantni tokom svih 100 provedenih proračuna. Dobiveni rezultati prikazani su u sljedećim slikama:

- Na slici 4.9. prikazano je kako razmak između ploča utječe na odabrani i potrebni broj ploča.
- Na slici 4.10. prikazano je kako razmak između ploča utječe na duljinu pločastog izmjenjivača.
- Na slici 4.11. prikazano je kako razmak između ploča utječe na potrebnu snagu pumpe za pogon radnih tvari.

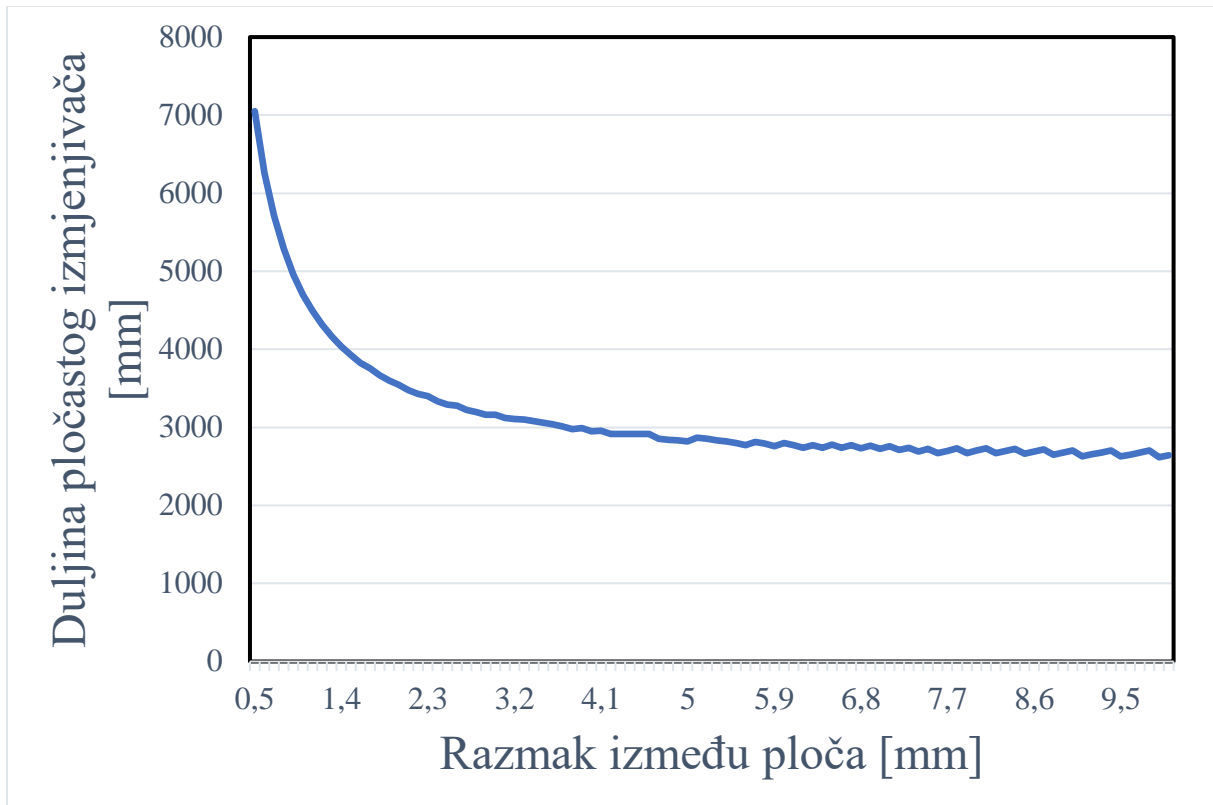


Slika 4.9. Utjecaj razmaka između ploča na broj ploča

Slika 4.9. uspoređuje odabrani broj ploča kojima se zadovoljava maksimalna brzina strujanja fluida od 1 m/s (ograničenje pada tlaka i snage pumpi) i potrebni broj ploča kojima se postiže dovoljna površina izmjene topline kako bi struja morske voda predala struji glikol-vode toplinski tok potreban za uplinjavanje UPP-a.

Na slici 4.9. vidljivo je da se linije potrebnog broja ploča (za postizanje potrebne površine izmjene topline) i odabranog broja ploča (uz uvjet maksimalne brzine strujanja fluida od 1 m/s) križaju na razmaku od približno 2,6 mm. To znači da se potreban broj ploča zadovoljava na

razmacima između ploča od 2,6 mm ili manjima. Veći razmaci između ploča zadovoljavaju uvjet maksimalne brzine strujanja fluida od 1 m/s, međutim nisu u mogućnosti osigurati potreban toplinski tok za potpuno uplinjavanje UPP-a. Razmaci manji od 2,6 mm mogući su s gledišta potrebne površine izmjene topline i potrebnog toplinskog toka, međutim rezultiraju prevelikim otporima strujanja i potrebnim snagama pumpi većima od 1 MW (prema izrazima 4.34 i 4.35). Za razmake od 2,1 mm ili manje potrebna snaga pumpe prelazi 1 MW prikazano na slici 4.11. U skladu s time razmak koji je usvoje za proračun je 2,6 mm.

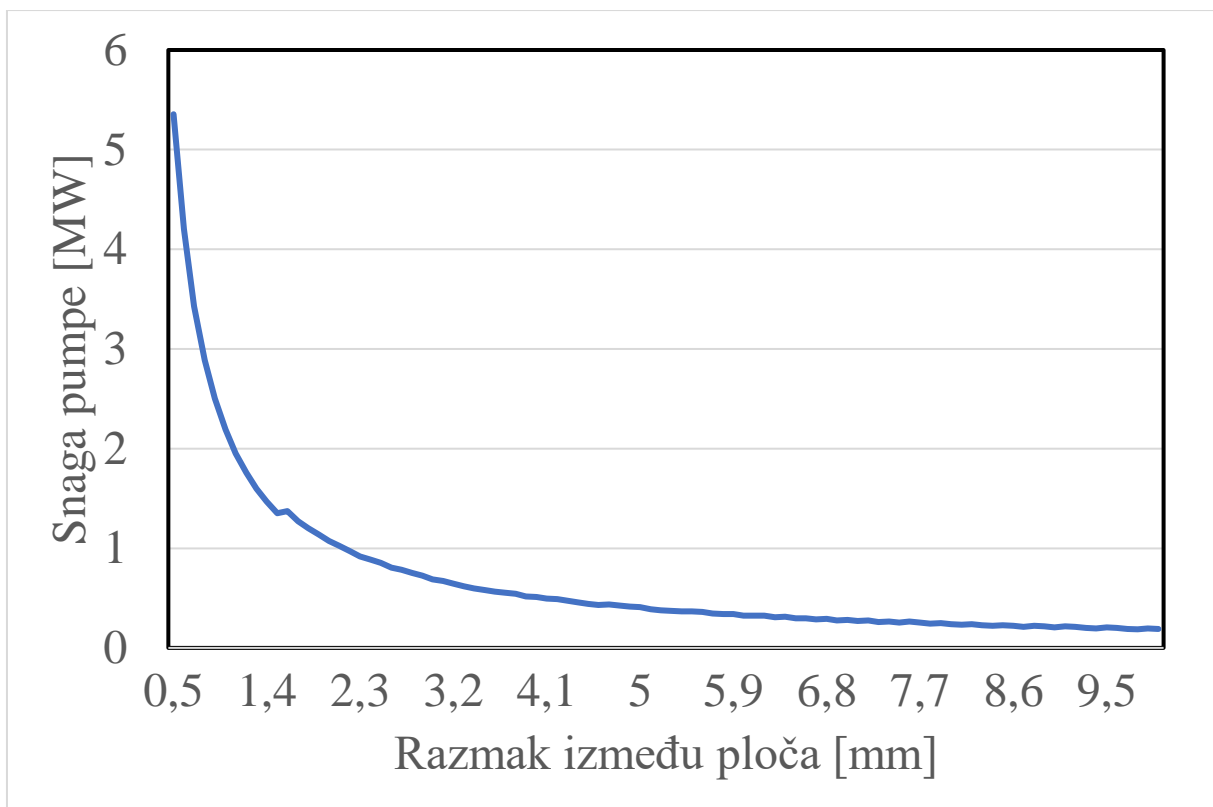


Slika 4.10. Utjecaj razmaka između ploča na duljinu izmjenjivača

Iako se logičkim zaključivanjem može doći do odgovora da veći razmak između ploča rezultira većom duljinom izmjenjivača topline, to u ovom slučaju nije tako. Na slici 4.10. vidljivo je da je situacija u ovom slučaju obrnuta. Što je manji razmak među pločama duljina izmjenjivača biti će biti veća. Razlog tome može se iščitati iz slike 4.9. koji nam prikazuje da što je manji razmak biti će puno veći broj odabranih ploča. U skladu s time uzimajući u obzir da izmjenjivač bude normalnih dimenzija i da broj ploča ne bude prevelik, slika 4.10. potvrđuje da je razmak od 2,6 mm bio dobar odabir. Također, treba spomenuti da izmjenjivači s razmacima između

ploča većima od 2,6 mm nisu u mogućnosti postići potrebni toplinski tok za potpuno ukapljivanje UPP-a.

Konačno dolazimo i do zadnjeg dijagrama koji prikazuje utjecaj razmaka između ploča na potrebnu snagu pumpe. Na slici 4.11. jasno je vidljivo da što je veći razmak između ploča potrebna je manja snaga pumpe za savladati gubitke u izmjenjivaču. Još jedan argument tome da raspon razmaka između ploča koji istovremeno zadovoljava oprečne zahtjeve toplinskog toka i otpora strujanja obuhvaća usko područje dozvoljenih vrijednosti. Po mogućnosti treba razmak između ploča odabrati na gornjoj granici dozvoljenog raspona razmaka između ploča kako bi se snaga pumpi ograničila na prihvatljive veličine.

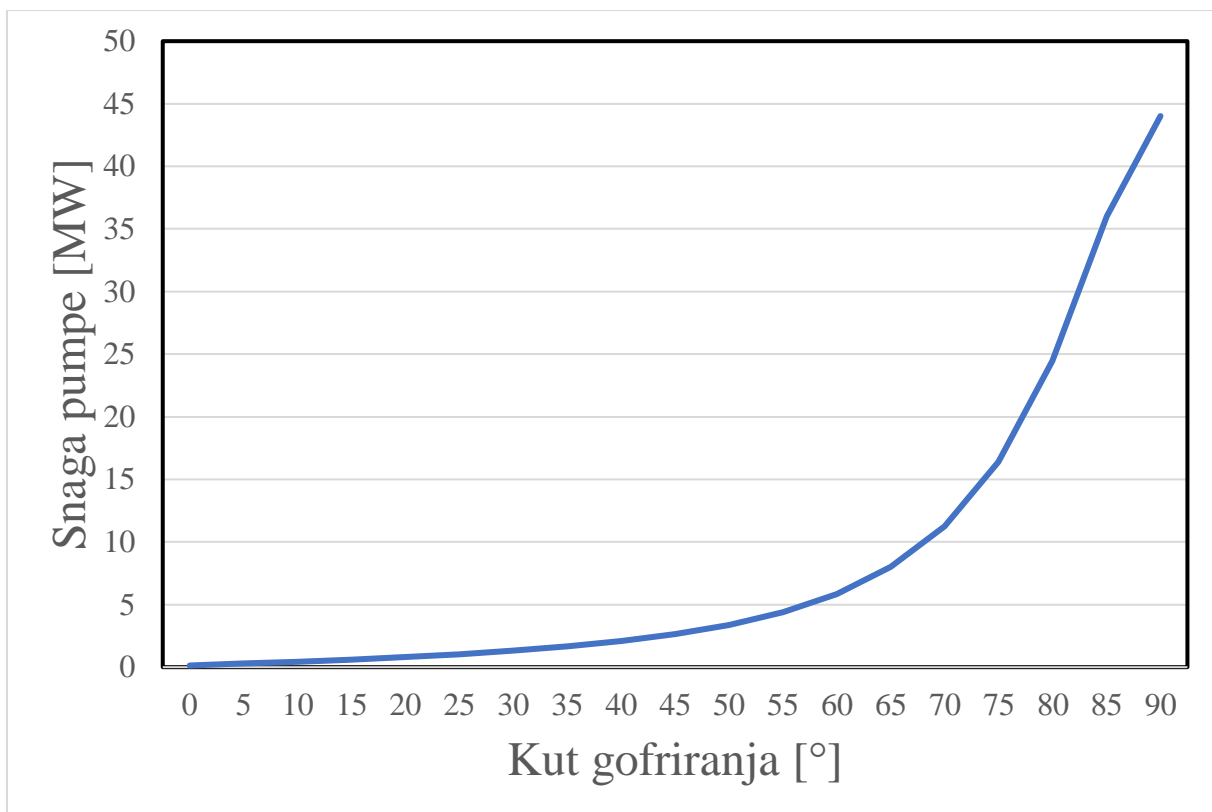


Slika 4.11. Utjecaj razmaka između ploča na duljinu izmjenjivača

Za kut gofriranja promatralo se kako utječe na rad i dimenzije pločastog izmjenjivača topline. Analiza se provodila na način da se proračun proveo za kutove od 0 do 90°, s korakom od 1°. Mijenjali su se jedino parametri na koje utječe kut gofriranja, dok su ostali parametri bili konstantni tokom svih 90 provedenih proračuna. Dobiveni rezultati prikazani su u sljedećim slikama:

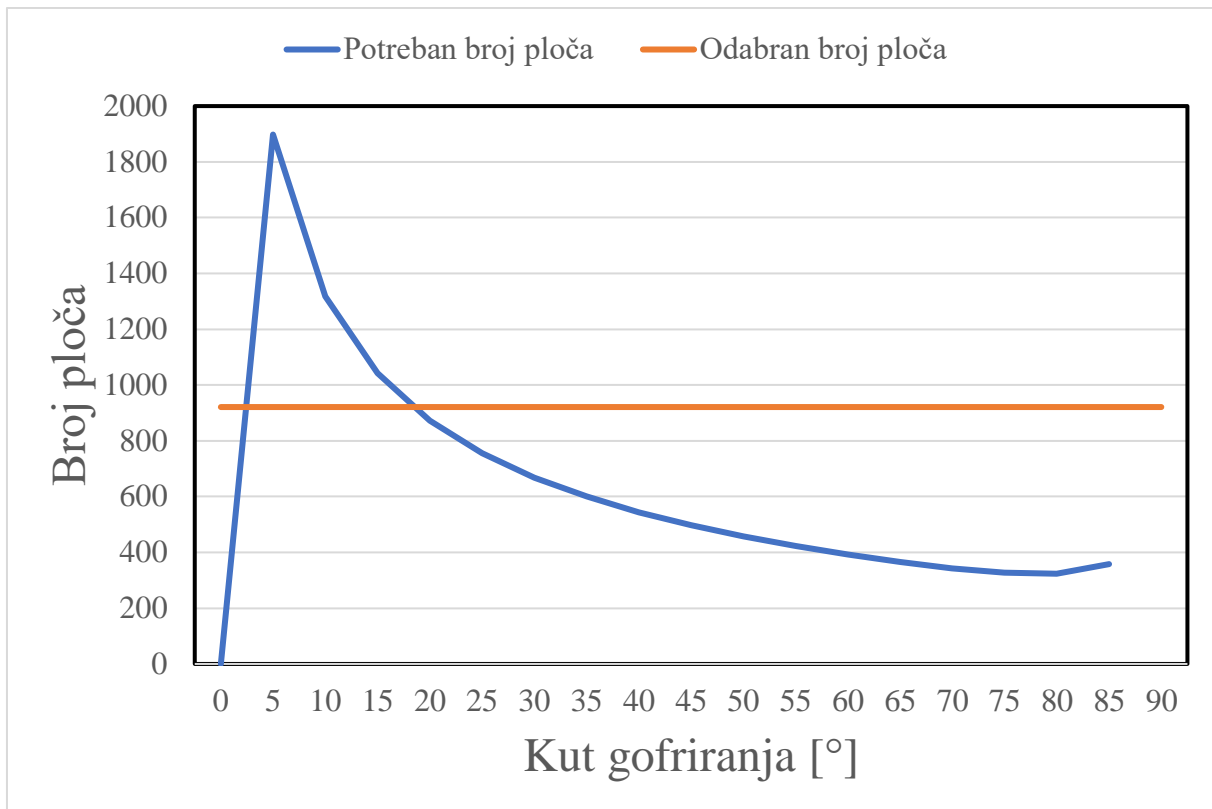
- Na slici 4.12. prikazano je kako kut gofriranja utječe na potrebnu snagu pumpe za pogon fluida.
- Na slici 4.13. prikazano je kut gofriranja utječe na potreban broj ploča u izmjenjivaču topline.

Što je veći kut gofriranja bit će potrebna i snažnija puma. To potvrđuje slika 4.12. Razlog leži u tome što veći kutovi gofriranja uzrokuju veće otpore strujanju pa posljedično i veće padove tlaka. Međutim, pojačana turbulencija u struji fluida poboljšava i izmjenu topline u pločastom izmjenjivaču topline. Kako je prikazano na slici 4.13., veći kut gofriranja rezultira manjim brojem potrebnih ploča. To je zato jer veći kut gofriranja povećava koeficijent prolaza topline, a time smanjuje površinu izmjene topline i potreban broj ploča. S druge strane, smanjenje kuta gofriranja vodi rezultira smanjenjem koeficijenta prolaza topline, ali i do povećanja površine izmjene topline i potrebnog broja ploča. Uzevši u obzir slike 4.12. i 4.13. dolazi se do zaključka da, poput razmaka između ploča, postoji i uski raspon kutova gofriranja koji istovremeno zadovoljavaju zahtjeve izmjene topline i otpora strujanja.



Slika 4.12. Utjecaj kuta gofriranja na potrebnu snagu pumpe

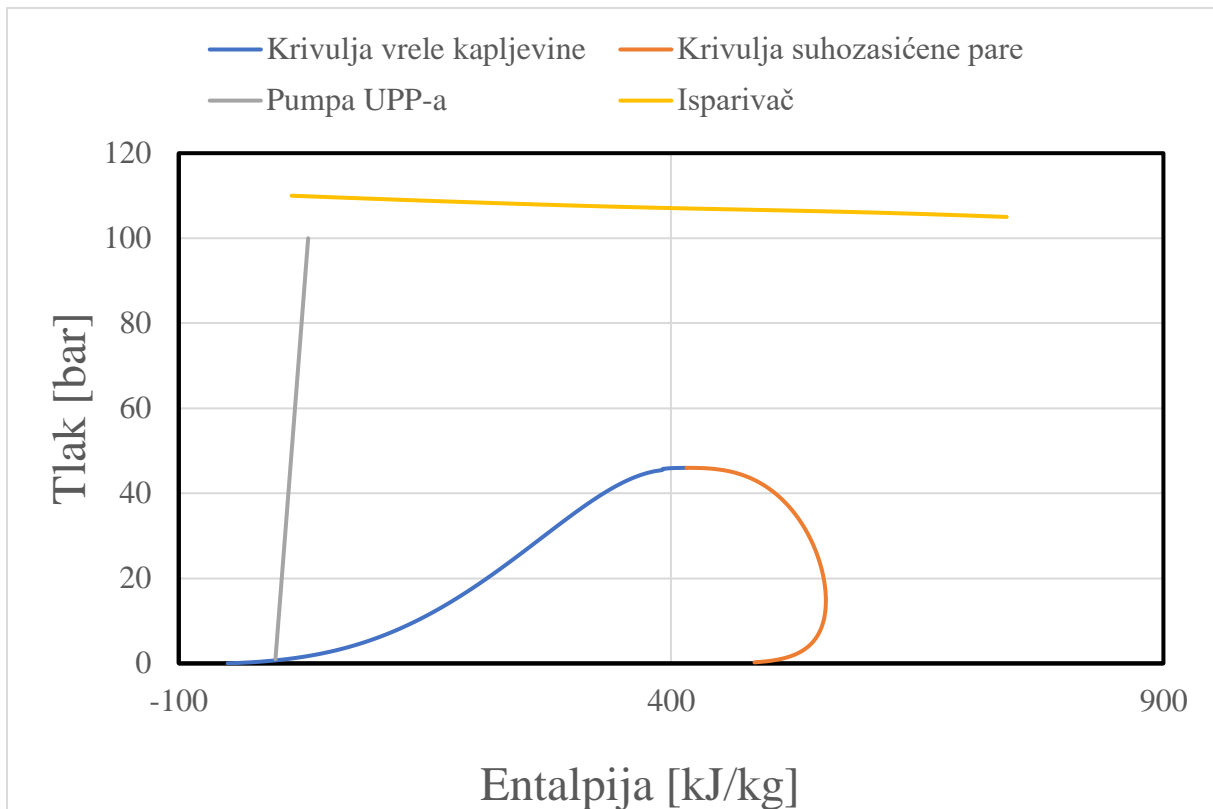




Slika 4.13. Utjecaj kuta gofriranja na potreban broj ploča

### 4.3. Proračun izmjenjivača topline tipa cijevi u plaštu

U izmjenjivaču topline tipa cijevi u plaštu vrši se prijelaz topline sa smjese glikol-voda ( $\xi = 0,6$ ) na ukapljeni prirodni plin radi predaje topline za njegovo uplinjavanje. Potrebni toplinski učin izmjenjivača, izračunat u izrazu (4.6), iznosi 137,637 MW. Ulazna temperatura smjese glikol-voda iznosi 10 °C, a izlazna temperatura 0 °C. Ulazna temperatura ukapljenog prirodnog plina iznosi -162 °C, a izlazna temperatura prirodnog plina u plinovitom stanju je 5 °C. Treba spomenuti da se ukapljeni prirodni plin komprimira na tlak transportnog sustava od 100 bar prije samog ulaza u izmjenjivač topline cijevi u plaštu. Stoga se uplinjavanje UPP-a odvija u nadkritičnom području, a ne promjenom stanja kroz zasićeno područje. Na slici 4.14. prikazan je p-h dijagram koji pokazuje kompresiju tekuće faze i uplinjavanje u nadkritičnom području.



Slika 4.14. p-h dijagram kompresije tekuće faze prirodnog plina i uplinjavanja u nadkritičnom području

Fizikalna svojstva radnih tvari računaju se za srednju temperaturu ulaza i izlaza iz isparivača. Za smjesu glikol-voda srednja temperatura iznosi 5 °C a za prirodni plin -83,5 °C. Fizikalna svojstva za smjesu glikol-voda prikazana su u tablici 4.3., a za prirodni plin u tablici 4.4.

Tablica 4.3. Fizikalna svojstva smjese glikol-voda ( $\xi = 0,6$ ).

| Fizikalna svojstva smjese glikol-voda  |          |
|--|----------|
| Temperatura [°C]                       | 5        |
| Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]           | 1085,369 |
| Dinamička viskoznost [Pas]             | 0,008649 |
| Koeficijent provođenja topline [W/mK]  | 0,349534 |
| Specifični toplinski kapacitet [J/kgK] | 3000,565 |

Tablica 4.4. Fizikalna svojstva prirodnog plina

| Fizikalna svojstva smjese prirodnog plina |                       |
|---|-----------------------|
| Temperatura [°C]                          | -83,5                 |
| Tlak, bar                                 | 100                   |
| Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]              | 282,609               |
| Dinamička viskoznost [Pa·s]               | 3,26·10 <sup>-5</sup> |
| Koeficijent provođenja topline [W/mK]     | 0,09027               |
| Specifični toplinski kapacitet [J/kgK]    | 4907,15               |

Sustav je predviđen na način da smjesa glikol-voda struji kroz cijevi izmjenjivača topline, a prirodni plin u plaštu izmjenjivača. Poznate su sljedeće vrijednosti radnih tvari.

- maseni protok smjese glikol-voda  $\dot{G}_g = 4587,04$  kg/s,
- volumni protok smjese glikol-voda  $\dot{V}_g = 4,226$  m<sup>3</sup>/s,
- maseni protok prirodnog plina  $\dot{G}_m = 187,549$  kg/s
- volumni protok prirodnog plina  $\dot{V}_m = 0,6636$  m<sup>3</sup>/s
- maksimalna brzina strujanja smjese glikol-voda  $w_{g,max} = 3$  m/s

Osim poznatih svojstava radnih tvari, prije početka proračuna, potrebno je odrediti i promjer cijevi koje se nalaze unutar bubnja. Odabrana je cijev vanjskog promjera  $d_v = 0,03$  m i unutarnjeg promjera  $d_u = 0,025$  m.

Proračunom je potrebno dimenzionirati cijevi za izmjenjivač da zadovolje uvjete izmjene topline, ali da brzina strujanja smjese glikol-voda bude u cijevima ne prelazi 3 m/s. S obzirom na to potreban broj cijevi da bi brzina bila manja od maksimalno određene računa se kao što je prikazano u izrazu (4.44).

$$n_c = \frac{4 \cdot \dot{V}_g}{w_{g,max} \cdot d_u^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 4,226}{3 \cdot 0,025^2 \cdot \pi} = 2869,89 \rightarrow n_c = 2870 \quad (4.44)$$

Gdje je:

$n_c$  = minimalan potreban broj cijevi da brzina smjese glikol-voda u cijevi ne bi prelazila maksimalnu

$\dot{V}_g$  = Volumni protok smjese glikol-voda ( $m^3/s$ )

$w_{g,max}$  = maksimalna dozvoljena brzina strujanja smjese glikol voda u cijevi (m/s)

$d_u$  = unutarnji promjer cijevi (m)

Na temelju izračunatog broja cijevi  $n_c = 2870$  moguće je odrediti broj upisanih šesterokuta ( $m_\xi$ ) iz sljedećeg izraza:

$$m_\xi = \left( \frac{n_c}{3} - \frac{1}{12} \right)^{0,5} - \frac{1}{2} = 30,43 \rightarrow m_\xi = 31 \quad (4.45)$$

Gdje je:

$m_\xi$  = broj upisanih šesterokuta ( $m_\xi = 31$ )

$n_c$  = minimalan potreban broj cijevi da brzina smjese glikol-voda u cijevi ne bi prelazila maksimalnu

Standardni broj cijevi dobiva se iz broja upisanih šesterokuta, odnosno pronalaskom broja cijevi iz izraza (4.46)

$$n_{c,st} = 1 + 3 \cdot m_\xi + 3 \cdot m_\xi^2 = 1 + 3 \cdot 31 + 3 \cdot 31^2 = 2977 \quad (4.46)$$

Gdje je:

$n_{c,st}$  = standardni broj cijevi

$m_\xi$  = broj upisanih šesterokuta ( $m_\xi = 31$ )

Broj cijevi u dijagonali određuje se kao što je prikazano u izrazu (4.47).

$$n' = 2 \cdot m_\xi + 1 = 2 \cdot 31 + 1 = 63 \quad (4.47)$$

Gdje je:

$n'$  = broj cijevi u dijagonali

$m_\xi$  = broj upisanih šesterokuta ( $m_\xi = 31$ )

Temeljem izračunatog broja cijevi u dijagonali, koraka cijevi, vanjskog promjera cijevi i udaljenosti između cijevi i stijenke bubnja moguće je odrediti proračunski promjer bubnja, prikazano u izrazu (4.48).

$$D_u = (n' - 1) \cdot t + d_v + 2 \cdot e = (63 - 1) \cdot 1,5 \cdot 0,03 + 0,03 + 2 \cdot 0,01 = 2,84 \text{ m} \quad (4.48)$$

Gdje je:

$D_u$  = unutarnji proračunski promjer bubnja (m)

$n'$  = broj cijevi u dijagonali

$t$  = korak cijevi, računa se kao  $(1,3..1,5) \cdot d_v$  (m)

$d_v$  = vanjski promjer cijevi (m)

$e$  = usvojena udaljenost između cijevi i stijenke bubnja (m)

Realni promjer bubnja se određuje na način da se uvijek odabire prva veća dimenzija od proračunski dobivene. Odabire se cijev veličine 120" (NO3000), odnosno cijev s vanjskim promjerom od 3,048 m, prema izvoru. [12]

Debljina stijenke cijevi NO3000 iznosi 1" (25,4 mm), tako da unutarnji promjer cijevi iznosi  $D_{u,r} = 3,048 - 2 \times 0,0254 = 2,9972 \text{ m}$ .

Stvarna brzina strujanja smjese glikol-voda u cijevima iznosi:

$$w_g = \frac{4 \cdot \dot{V}_g}{n_c \cdot d_u^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 4,226}{2977 \cdot 0,025^2 \cdot \pi} = 2,89 \frac{\text{m}}{\text{s}} < w_{g,\text{max}} = 3 \text{ m/s} \quad (4.49)$$

Gdje je:

$w_g$  = brzina strujanja smjese glikol voda u cijevi (m/s)

$\dot{V}_g$  = Volumni protok smjese glikol-voda ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$n_{cj}$  = odabran broj cijevi

$d_u$  = unutarnji promjer cijevi (m)

Za daljnji tijek proračuna potrebno je odrediti i ekvivalentan promjer koji će se koristiti kod izračuna bezdimenzijskih značajka i koeficijenta prijelaza topline. Izračun ekvivalentnog promjera prikazan je u izrazu (4.50).

$$d_{ek} = \frac{D_{u,r}^2 - n_{cj} \cdot d_v^2}{D_{u,r} + n_{cj} \cdot d_v} = \frac{2,9972^2 - 2977 \cdot 0,03^2}{2,9972 + 2977 \cdot 0,03} = 0,06829 \text{ m} \quad (4.50)$$

Gdje je:

$d_{ek}$  = ekvivalentni promjer (m)

$D_{u,r}$  = unutarnji promjer bubnja (m)

$n_{cj}$  = odabran broj cijevi

$d_v$  = vanjski promjer cijevi (m)

Kako bi se odredio koeficijent prijelaza topline potrebno je odrediti bezdimenzijske značajke. Izračuna bezdimenzijske Reynoldsove značajke za smjesu glikol-voda prikazan je u izrazu (4.51), a za metan u izrazu (4.52).

$$Re_g = \frac{w_g \cdot \rho_g \cdot d_u}{\eta_g} = \frac{2,89 \cdot 1085,37 \cdot 0,025}{0,008649} = 9073,43 \quad (4.51)$$

Gdje je:

$Re_g$  = Reynoldsova bezdimenzijska značajka za smjesu glikol-voda

$w_g$  = brzina strujanja smjese glikol voda u cijevi (m/s)

$d_u$  = unutarnji promjer cijevi (m)

$\rho_g$  = gustoća smjese glikol-voda ( $\text{kg/m}^3$ )

$\eta_g$  = Dinamička viskoznost smjese glikol-voda (Pas)

$$Re_m = \frac{4 \cdot \dot{G}_m}{(D_{u,r}^2 \cdot \pi - n_{cj} \cdot d_v^2 \cdot \pi)} \cdot \frac{d_{ek}}{\eta_m} = \frac{4 \cdot 187,549}{(2,9972^2 \cdot \pi - 2977 \cdot 0,03^2 \cdot \pi)} \cdot \frac{0,06829}{3,26 \cdot 10^{-5}} = 79333,34 \quad (4.52)$$

Gdje je:

$Re_m$  = Reynoldsova bezdimenzijska značajka za metan

$\dot{G}_m$  = maseni protok metana (kg/s)

$d_{ek}$  = ekvivalentni promjer (m)

$D_{u,r}$  = realni unutarnji promjer bubnja (m)

$n_{cj}$  = odabran broj cijevi

$d_v$  = vanjski promjer cijevi (m)

$\eta_m$  = Dinamička viskoznost metana (Pas)

Osim Reynoldsove potrebno je odrediti i Prandtlove bezdimenzijske značajke. Izračun Prandtlove bezdimenzijske značajke za smjesu glikol-voda prikazan je u izrazu (4.53), a za metan u izrazu (4.54).

$$Pr_g = \frac{\eta_g \cdot c_g}{\lambda_g} = \frac{0,008649 \cdot 3000,57}{0,3495} = 74,245 \quad (4.53)$$

Gdje je:

$Pr_g$  = Prandtlova bezdimenzijska značajka smjese glikol-voda

$\eta_g$  = Dinamička viskoznost smjese glikol-voda (Pas)

$c_g$  = specifični toplinski kapacitet smjese glikol-voda (J/kgK)

$\lambda_g$  = koeficijent provođenja topline smjese glikol-voda (W/mK)

$$Pr_m = \frac{\eta_m \cdot c_m}{\lambda_m} = \frac{3,26 \cdot 10^{-5} \cdot 4907,145}{0,09027} = 1,773 \quad (4.54)$$

Gdje je:

$Pr_m$  = Prandtlova bezdimenzijska značajka za metan

$\eta_m$  = Dinamička viskoznost metana (Pas)

$c_m$  = specifični toplinski kapacitet metana (J/kgK)

$\lambda_m$  = koeficijent provođenja topline metana (W/mK)

Nakon dobivenih Reynoldsovih i Prandtlovih značajki potrebno je izračunati i Nusseltovu bezdimenzijsku značajku. Izračun za smjesu glikol-voda prikazan je u izrazu (4.55).

$$\begin{aligned}
Nu_g &= 0,0398 \cdot Pr_g \cdot \frac{Re_g^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot Pr_g^{-\frac{1}{8}} \cdot Re_g^{-\frac{1}{8}} \cdot (Pr_g - 1)} \\
&= 0,0398 \cdot 74,24 \cdot \frac{9073,43^{\frac{3}{4}}}{1 + 1,5 \cdot 74,24^{-\frac{1}{8}} \cdot 9073,43^{-\frac{1}{8}} \cdot (74,24 - 1)} = 127,62 \quad (4.55)
\end{aligned}$$

Gdje je:

$Nu_g$  = Nusseltova značajka za smjesu glikol-voda

$Pr_g$  = Prandtlova značajka za smjesu glikol-voda

$Re_g$  = Reynoldsova značajka za smjesu glikol-voda

Kako metan ne struji kroz cijevi, već unutar bubnja, njegova Nusseltova značajka računa se na drugi način. Prvo je potrebno izračunati konstantu  $C$ , specifičnu za izmjenjivače tipa cijevi u plaštu. Izračun je prikazan u izrazu (4.56). Potom se računa Nusseltova značajka, prikazano u izrazu (4.57).

$$C = 0,026 \cdot \frac{t}{d_v} - 0,006 = 0,026 \cdot \frac{1,5 \cdot 0,03}{0,03} - 0,006 = 0,033 \quad (4.56)$$

Gdje je:

$C$  = konstanta kod izmjenjivača cijevi u plaštu potrebna za izračun Nusseltove značajke

$t$  = korak cijevi, računa se kao  $(1,3..1,5) \cdot d_v$  (m)

$d_v$  = vanjski promjer cijevi (m)

$$Nu_m = C \cdot Re_m^{0,8} \cdot Pr_m^{\frac{1}{3}} = 0,033 \cdot 79333,34^{0,8} \cdot 1,7726^{\frac{1}{3}} = 331,857 \quad (4.57)$$

Gdje je:

$Nu_m$  = Nusseltova značajka za metan

$C$  = konstanta kod izmjenjivača cijevi u plaštu potrebna za izračun Nusseltove bezdimenzijske značajke

$Re_m$  = Reynoldsova značajka za metan



$Pr_m$  = Prandtlova značajka za metan

Konačno mogu se izračunati i koeficijenti prijelaza topline sa obje strane cijevi. Izračun za koeficijent prijelaza topline za smjesu glikol-voda prikazan je u izrazu (4.58), a za metan u izrazu (4.59).

$$\alpha_g = \frac{Nu_g \cdot \lambda_g}{d_u} = \frac{127,62 \cdot 0,3495}{0,025} = 1784,25 \frac{W}{m^2K} \quad (4.58)$$

Gdje je:

$\alpha_g$  = koeficijent prijelaza topline za smjesu glikol-voda (W/m<sup>2</sup>K)

$\lambda_g$  = koeficijent provođenja topline za smjesu glikol-voda (W/mK)

$d_u$  = unutarnji promjer cijevi (m)

$$\alpha_m = \frac{Nu_m \cdot \lambda_m}{d_{ek}} = \frac{331,857 \cdot 0,09027}{0,06829} = 438,654 \frac{W}{m^2K} \quad (4.59)$$

Gdje je:

$\alpha_m$  = koeficijent prijelaza topline metana (W/m<sup>2</sup>K)

$\lambda_m$  = koeficijent provođenja topline metana (W/mK)

$d_{ek}$  = ekvivalentni promjer (m)

Slijedi izračun koeficijenta prolaza topline, prikazan u izrazu (4.60).

$$k = \frac{1}{\frac{d_v}{\alpha_g \cdot d_u} + \frac{d_v}{2 \cdot \lambda_a} \cdot \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{\alpha_m}} = \frac{1}{\frac{0,03}{1784,25 \cdot 0,025} + \frac{0,03}{104,67} \cdot \ln \frac{0,03}{0,025} + \frac{1}{438,65}} = 335,753 \frac{W}{m^2K} \quad (4.60)$$

Gdje je:

$k$  = koeficijent prolaza topline (W/m<sup>2</sup>K)

$d_v$  = vanjski promjer cijevi (m)

$\alpha_g$  = koeficijent prijelaza topline za smjesu glikol-voda (W/m<sup>2</sup>K)

$d_u$  = unutarnji promjer cijevi (m)

$\lambda_a$  = koeficijent provođenja topline aluminij slitine (W/mK)

$\alpha_m$  = koeficijent prijelaza topline metana (W/m<sup>2</sup>K)

Za računanje minimalne potrebne površine izmjene topline potrebno je izračunati srednju logaritamsku razliku temperatura, prikazano u izrazu (4.61).

$$\begin{aligned}\Delta T &= \frac{\Delta T' - \Delta T''}{\ln \frac{\Delta T'}{\Delta T''}} = \frac{(T'_g - T'_m) - (T''_g - T''_m)}{\ln \frac{(T'_g - T'_m)}{(T''_g - T''_m)}} = \frac{(283,15 - 278,15) - (273,15 - 111,15)}{\ln \frac{(283,15 - 278,15)}{(273,15 - 111,15)}} \\ &= \frac{5 - 162}{\ln \frac{5}{162}} = 45,14 \text{ K}\end{aligned}\quad (4.61)$$

Gdje je:

$\Delta T$  = srednja logaritamska razlika temperatura (K)

$T'_g$  = temperatura smjese glikol-voda na ulazu u izmjenjivač (K)

$T''_g$  = temperatura smjese glikol-voda na izlazu iz izmjenjivača (K)

$T'_m$  = temperatura metana na ulazu u izmjenjivač (K)

$T''_m$  = temperatura metana na izlazu iz izmjenjivača (K)

Konačno, potrebna površina izmjene topline računa se kao u izrazu (4.62).

$$A = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta T} = \frac{137637203,2}{335,753 \cdot 45,14} = 9081,67 \text{ m}^2 \quad (4.62)$$

Gdje je:

$A$  = potrebna površina izmjene topline (m<sup>2</sup>)

$\dot{Q}$  = maksimalni toplinski učin izmjenjivača (W)

$k$  = koeficijent prolaza topline (W/m<sup>2</sup>K)

$\Delta T$  = srednja logaritamska razlika temperatura (K)

Ako se minimalna površina izmjene topline podijeli sa umnoškom broja cijevi, vanjskog promjera i broja  $\pi$  dobije se minimalna potrebna duljina izmjenjivača topline, matematički zapisano u izrazu (4.63).

$$L = \frac{A}{n_{cj} \cdot d_v \cdot \pi} = \frac{9081,67}{2977 \cdot 0,03 \cdot \pi} = 32,368 \text{ m} \quad (4.63)$$

Gdje je:

$L$  = minimalna potrebna duljina izmjenjivača (m)

$A$  = potrebna površina izmjene topline (m<sup>2</sup>)

$n_{cj}$  = odabran broj cijevi

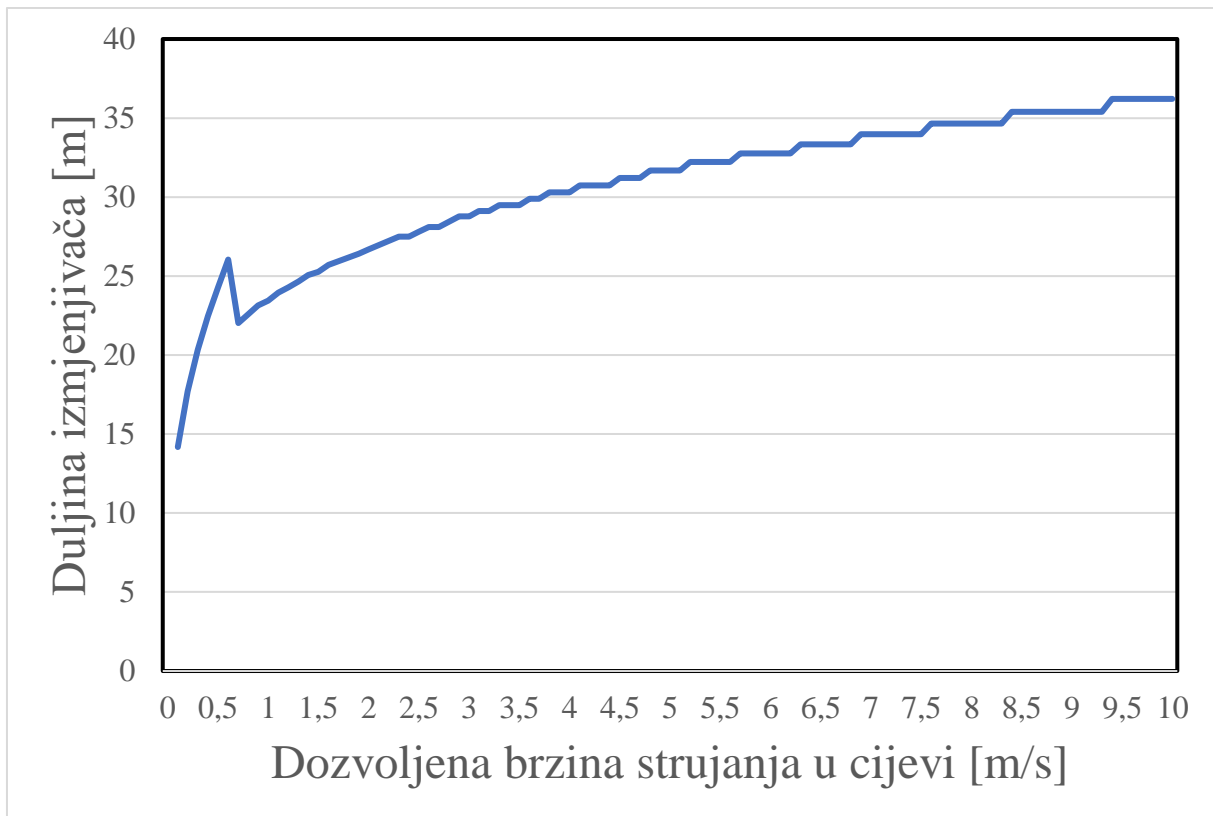
$d_v$  = vanjski promjer cijevi (m)

#### 4.3.1. Analiza dobivenih rezultata

Analiza se provodila za utjecaj brzine strujanja fluida u cijevima.

Za brzinu strujanja smjese glikol-voda promatralo se kako to utječe na izmjenu topline, broj cijevi i dimenzije izmjenjivača. Analiza se provodila na način da se proračun proveo za brzine od 0,1 do 10 m/s. Mijenjali su se jedino parametri na koje utječe brzina strujanja glikol-vode dok su ostali parametri bili konstantni tokom svih 99 provedenih proračuna. Dobiveni rezultati prikazani su u sljedećim slikama:

- Na slici 4.15. prikazano je kako brzina strujanja glikol-vode utječe na duljinu izmjenjivača.
- Na slici 4.16. prikazano je kako brzina strujanja glikol-vode utječe na broj cijevi u izmjenjivaču.
- Na slici 4.17. prikazano je kako brzina strujanja glikol-vode utječe na potrebnu površinu za izmjenu topline.
- Na slici 4.18. prikazano je kako brzina strujanja glikol-vode utječe na koeficijent prolaza topline.

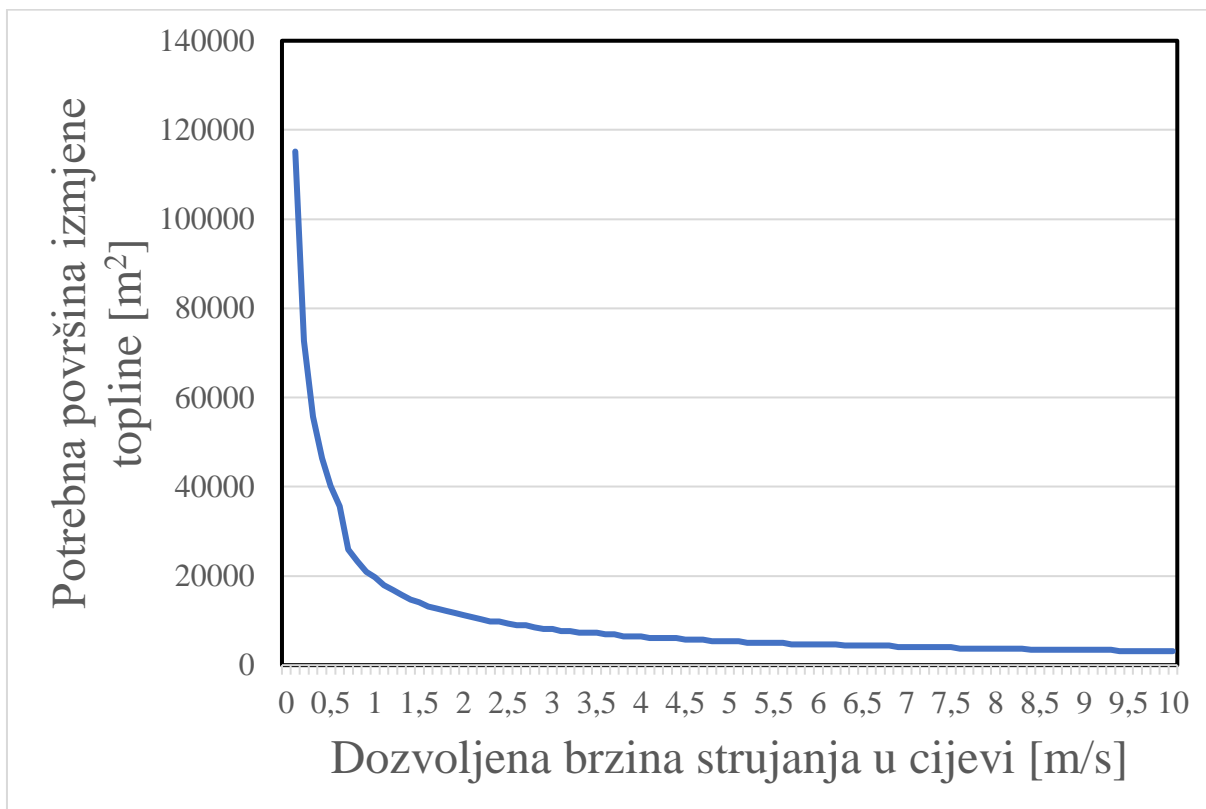


Slika 4.15. Utjecaj brzine strujanja glikol-vode na duljinu izmjenjivača

Na slici 4.15. jasno se vidi da je sa većom brzinom i izmjenjivač duži. Razlog tomu može se iščitati iz slike 4.16. gdje se vidi sa većim brzinama dolazi do strmoglavog pada broja cijevi, međutim potrebna površina izmjene topline mora biti zadovoljena (slika 4.17.). Jasno je da broj cijevi pada kada se poveća maksimalno dozvoljena brzina jer se omogućuje sužavanje ukupnog presjeka strujanja, a volumni protok ostaje isti.

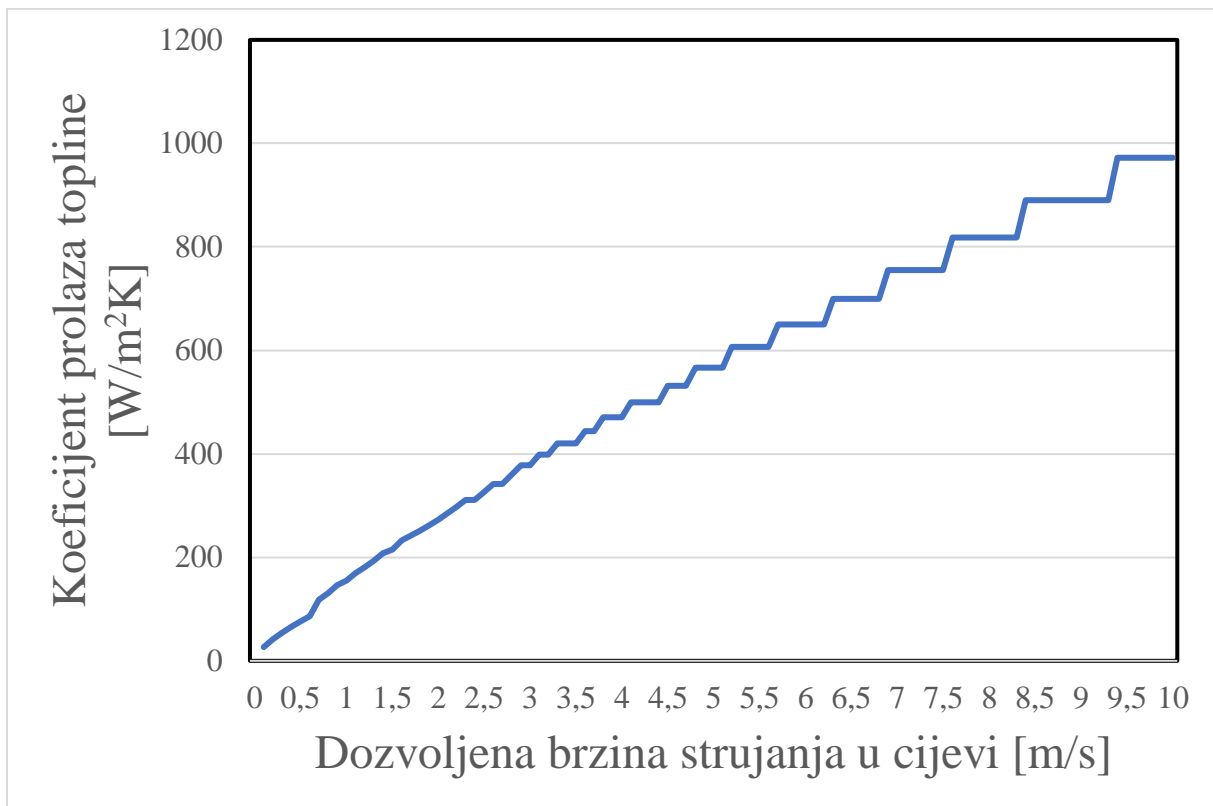


Slika 4.16. Utjecaj brzine strujanja glikol-vode na broj cijevi u izmjenjivaču



Slika 4.17. Utjecaj brzine strujanja glikol-vode na potrebnu površinu izmjene topline

Na slici 4.18. prikazano je kako koeficijent prolaza topline raste sa povećanjem brzine. Time se automatski dobiva bolja izmjena topline uslijed povećanih turbulencija u struji fluida. Međutim opet je potrebno pronaći optimalnu brzinu strujanja. Osim dovoljne količine izmjenjene topline potrebno je obratiti pažnju i na dimenzije izmjenjivača. U proračunu je odabrana maksimalna dozvoljena brzina od 3 m/s što daje solidne rezultate u izmjeni topline, a opet potrebna površina izmjene topline, duljina i broj cijevi u izmjenjivaču nisu preveliki.



Slika 4.18. Utjecaj brzine strujanja glikol-vode na koeficijent prolaza topline

## 5. ZAKLJUČAK

Ukapljivanjem prirodnog plina značajno se smanjuje volumen što olakšava prijevoz i skladištenje. Iako proces ukapljivanja traži značajnu investiciju, prijevoz ukapljenog prirodnog plina je isplativiji od kopnenih plinovoda na većim udaljenostima. S obzirom na rastuću potražnju za ukapljenim prirodnim plinom kao alternativnim dobavnim pravcem prirodnom plinu iz kopnenih plinovoda, dolazi do sve većih ulaganja u obalna i plutajuća postrojenja za prihvata, skladištenje i uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina. U radu su obrađene najzastupljenije tehnologije za uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina te su opisane prednosti i nedostaci pojedinih varijantnih rješenja. Bitno je pronaći ravnotežu između cijene investicije i dugoročne isplativosti projekta. Također, promatrajući tehničku stranu, potrebno je obratiti pažnju na radne tvori koje se koriste u procesu, njihove radne karakteristike unutar odabranog procesa za uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina. Nakon usporedbe i analize varijantnih rješenja može se pristupiti projektiranju i dimenzioniranju sustava za uplinjavanje prirodnog plina. Kod dimenzioniranja komponentni tog sustava potrebno je voditi brigu o početnoj investiciji projekta, ali i dugoročnoj isplativosti istoga, to jest treba uzeti u obzir troškove koji se javljaju u radu tokom godina. Primjerice, potrebno je naći ravnotežu između dimenzija izmjenjivača (ne smije biti prevelik, ali ni premali), broja ploča u izmjenjivaču i potrebne snage pumpe (poželjnija što manja, ali opet da izvrši zadatke). Proračunom je utvrđeno da bi optimalne dimenzije pločastog izmjenjivača topline, za LNG Terminal na Krku, bile:  $a \times b \times L = 4 \times 4 \times 3,277$  m. Utvrđeno je da bi radi mogućeg smrzavanja morske vode, kao sekundarni radni medij, bilo bolje koristiti smjesu etilen-glikol-voda ( $\xi = 0,6$ ). Konačno, za izmjenjivač topline tipa cijevi u plaštu proračunate su optimalne dimenzije. Unutarnji promjer bubnja iznosi 3,048 m, a debljine stijenke 0,0254 m. U bubnju su smještene 2977 cijevi promjera 0,030 m, a debljine stijenke 0,005 m. Osim projektiranja i pronalaženja mogućih rješenja bitno je voditi i brigu o utjecaju tog sustava na okoliš. Primjerice, u radu je dana procjena utjecaja na okoliš LNG terminala Krk iz koje se može izvući zaključak da iako utječe na okoliš, sve je u dopuštenim granicama, te se taj utjecaj nastoji smanjiti na minimum.

## LITERATURA

- [1] White, J.: „Developing and implementing floating regasification and liquefactions projects“, s interneta, [https://www.gti.energy/wp-content/uploads/2018/12/17-2-John\\_White-LNG17-Paper.pdf](https://www.gti.energy/wp-content/uploads/2018/12/17-2-John_White-LNG17-Paper.pdf), 03.10.2022.
- [2] RWE: „Floating storage and regasification units“, s interneta, <https://www.rwe.com/en/research-and-development/project-plans/floating-lng-terminals>, 03.10.2022.
- [3] Songhurst, B.: „The Outlook for Floating Storage and Regasification Units“, s interneta, <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2017/07/The-Outlook-for-Floating-Storage-and-Regasification-Units-FSRUs-NG-123.pdf>, 03.10.2022.
- [4] Wayne, W.S.: „Modification of LNG Carriers for Reagasification“, Houston, Texas, 2003.
- [5] Blecich, P.; Bonefačić, I.: „Predavanje 8 – Ukapljeni prirodni plin (LNG)“, Tehnički fakultet, Rijeka, 2022.
- [6] Patel, D. i dr.: „LNG VAPORIZER SELECTION BASED ON SITE AMBIENT CONDITIONS“, Gas Processors Association Europe, Edinburgh, 2013.
- [7] Mcguire. G.; White, B.: „Liquified Gas Handling principles On Ships and in Terminals“, Witherby, London, 2000.
- [8] Posavec, D.; Simon, K.; Malnar, M.: „Brodovi za ukapljeni prirodni plin“, s interneta, <https://hrcak.srce.hr/file/92363>, 07.10.2022.
- [9] Častek, M.; Krhen, H.; Palčić, M.: „Tehničko-tehnološka koncepcija plutajućeg Terminala za UPP na otoku Krku“, Nafta i Plin, Vol. 41. No.167., str. 81-87, Zagreb, 2021.
- [10] Kovačić, G. i dr.: „Studija o utjecaju na okoliš izmjena zahvata prihvatnog terminala za UPP na otoku Krku uvođenjem faze plutajućeg terminala za prihvat, skladištenje i uplinjavanje UPP-a“, Ekonerg, Zagreb, 2017.
- [11] Shah, R.K.; Sekulić, D.P.: „Fundamentals of Heat Exchanger Design“, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2003.
- [12] Large Pipe Sizes in Millimeters and Inches,



URL: [https://www.wermac.org/misc/large\\_pipesizes.html#gsc.tab=0](https://www.wermac.org/misc/large_pipesizes.html#gsc.tab=0)

## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 2.1. Prikaz prijema i predaje Prirodnog plina na FSRU postrojenju [2].....  | 2  |
| Slika 2.2. Pojednostavljeni prikaz procesa transporta UPP-a [5].....  | 4  |
| Slika 2.3. Sidrenje na plutači.....   | 5  |
| Slika 2.4. Sidrenje na gatu.....  | 5  |
| Slika 2.5. Shematski prikaz postrojenja za prihvata, skladištenje i uplinjavanje UPP-a [5].....                                   | 6  |
| Slika 2.6. Istakalačke ruke [5].....  | 7  |
| Slika 2.7. Shematski prikaz ORV isparivača [6].....   | 8  |
| Slika 2.8. Shematski prikaz SCV isparivača [6].....   | 10 |
| Slika 2.9. Shematski prikaz AAV isparivača [6].....   | 12 |
| Slika 2.10. Shematski prikaz IFV sustava isparivanja sa raznim pomoćnim izvorima topline [6].....                                 | 14 |
| Slika 2.11. Shematski prikaz IFV isparivačkog sustava sa ugljikovodikom kao radnom tvari u sekundarnom krugu [6].....             | 15 |
| Slika 2.12. Prikaz TGZ Mark III spremnika [5].....  | 17 |
| Slika 2.13. Presjek stijenke TGZ Mark III spremnika [8].....  | 18 |
| Slika 2.14. Presjek stijenke GT No. 96 spremnika [8].....   | 18 |
| Slika 2.15. Presjek stijenke GTT CS-1 spremnika [8].....  | 19 |
| Slika 2.16. Presjek kuglastog (Moss) spremnika [5].....   | 20 |
| Slika 2.17. Presjek prizmatskog spremnika (tip B) [8].....  | 20 |
| Slika 2.18. Prikaz inertiranja spremnika [5].....   | 21 |
| Slika 3.1. LNG terminal KrkOmišalj [5].....   | 24 |
| Slika 3.2. Dolazak prvog LNG tankera - Tristar Ruby (SAD) [9].....  | 25 |
| Slika 3.3. Shematski prikaz procesa na FSRU brodu [9].....  | 29 |
| Slika 3.4. Shematski prikaz procesa pretovara ukapljenog prirodnog plina [9].....   | 30 |
| Slika 3.5. Shematski prikaz procesa strujanja glikola i morske vode [9].....  | 32 |
| Slika 3.6. Shematski prikaz rada elektroenergetskog sustava na FSRU brodu [9].....  | 33 |
| Slika 4.1. Shematski prikaz indirektnog STV isparivača [10].....  | 38 |
| Slika 4.2. Usporedba specifičnih toplinskih kapaciteta vode i smjese glikol-voda ( $\xi = 0,6$ ) ..                               | 39 |
| Slika 4.3. Usporedba gustoća vode i smjese glikol-voda ( $\xi = 0,6$ ).....   | 40 |
| Slika 4.4. Usporedba koeficijenta provođenja topline vode i smjese glikol-voda ( $\xi = 0,6$ )...                                 | 40 |
| Slika 4.5. Usporedba dinamičkih viskoziteti vode i smjese glikol-voda ( $\xi = 0,6$ ).....  | 41 |
| Slika 4.6. p-h dijagram metana i usporedba kompresije UPP prije uplinjavanja i kompresije prirodnog plina nakon uplinjavanja..... | 42 |
| Slika 4.7. Shematski prikaz strujanja fluida unutar pločastog izmjenjivača topline.....   | 45 |
| Slika 4.8. Prikaz ploče sa „Chevron“ dizajnom [11].....   | 52 |
| Slika 4.9. Utjecaj razmaka između ploča na broj ploča.....  | 62 |
| Slika 4.10. Utjecaj razmaka između ploča na duljinu izmjenjivača.....   | 63 |
| Slika 4.11. Utjecaj razmaka između ploča na duljinu izmjenjivača.....   | 64 |
| Slika 4.12. Utjecaj kuta gofriranja na potrebnu snagu pumpe.....  | 65 |
| Slika 4.13. Utjecaj kuta gofriranja na potreban broj ploča.....   | 66 |
| Slika 4.14. p-h dijagram kompresije tekuće faze prirodnog plina i uplinjavanja u nadkritičnom području.....                       | 67 |
| Slika 4.15. Utjecaj brzine strujanja glikol-vode na duljinu izmjenjivača.....   | 77 |
| Slika 4.16. Utjecaj brzine strujanja glikol-vode na broj cijevi u izmjenjivaču.....   | 78 |
| Slika 4.17. Utjecaj brzine strujanja glikol-vode na potrebnu površinu izmjene topline.....  | 78 |
| Slika 4.18. Utjecaj brzine strujanja glikol-vode na koeficijent prolaza topline.....  | 79 |

## POPIS TABLICA

|   |    |
|---|----|
| Tablica 3.1. Glavne tehničke karakteristike terminala [9] .....                       | 26 |
| Tablica 3.2. Procjenjena količina goriva koje ulazi u proces [10] .....               | 34 |
| Tablica 3.3. Procjenjena količina slatke i morske vode koja ulazi u proces [10] ..... | 35 |
| Tablica 3.4. Procjenjena količina otpadne vode koja izlazi iz procesa [10] .....      | 36 |
| Tablica 3.5. Procjenjene količine emisija u zrak [10] .....                           | 37 |
| Tablica 4.1. Fizikalna svojstva morske vode .....                                     | 45 |
| Tablica 4.2. Fizikalna svojstva smjese glikol-voda.....                               | 46 |
| Tablica 4.3. Fizikalna svojstva smjese glikol-voda ( $\xi = 0,6$ ).....               | 67 |
| Tablica 4.4. Fizikalna svojstva prirodnog plina .....                                 | 68 |

## POPIS OZNAKA I KRATICA

FSRU - postrojenje za skladištenje i uplinjavanje prirodnog plina, *eng.* Floating Storage and Regasification Unit terminal

FRU - plutajuće postrojenje za uplinjavanje, *eng.* Floating Regasification Unit

SRV - brod za uplinjavanje i prijevoz prirodnog plina, *eng.* Shuttleand Regasification Vessel System

UPP – ukapljeni prirodni plin

LNG - ukapljeni prirodni plin, *eng.* liquid natural gas

ORV - otvoreni isparivači koji koriste morsku vodu u krugu izvora topline, *eng.* Open rack vaporizers

SCV - isparivači s uronjenim plinskim plamenikom (potopljeni isparivači), *eng.* Submerged combustion vaporizers

AAV - isparivači koji koriste toplinu atmosferskog zraka, *eng.* ambient air vaporizers

IFV - isparivači s radnom tvari u sekundarnom krugu između morske vode i ukapljenog prirodnog plina, *eng.* intermediate fluid vaporizers

Ppm – broj dijelova u odnosu na milijun, *eng.* parts per million

pH – broj koji služi za iskazivanje kiselosti, *lat.* Potentia hydrogenii

SCR – selektivna katalitička redukcija, *eng.* selective catalytic reduction

Temperatura – [°C]

LNGC – brodovi za prijevoz ukapljenog prirodnog plina, *eng.* liquid natural gas carriers

Tlak – [Pa], [bar]

DGE – donja granica eksplozivnosti

GGE – gornja granica eksplozivnosti

TGZ – skraćeno od Technigaz (ime tvrtke)

GT – skraćeno od Gaztransport (ime tvrtke)

GTT – skraćeno od Gaztransport & Technigaz (ime tvrtke)

CS – kombinirani sustav, eng. combined system

Volumni protok – [ $m_N^3/h$ ], [ $m^3/h$ ]

Volumen – [ $m^3$ ]

Duljina – [m], [mm]

PEHD – polietilen visoke gustoće

Snaga – [W]

$H_d$  – donja ogrjevna vrijednost, MJ/kg

$\dot{G}_m$  - maseni protok prirodnog plina u kotlovima, kg/s

$\dot{Q}_k$  - ulazna toplinska snaga kotlova, MW

$PP_{\%}$  - postotak prirodnog plina koji se troši na uplinjavanje UPP-a

$\dot{G}_{LNG}$  - prosječni kapacitet LNG terminala Krk, kg/s

$\Delta h$  - promjena entalpije, kJ/kg

$h_2$  - entalpija prirodnog plina na izlazu iz isparivača, kJ/kg

$h_1$  - entalpija ukapljenog prirodnog plina na ulazu u isparivač, kJ/kg

$\dot{V}_h$  - prosječni satni kapacitet LNG terminala Krk,  $m^3/h$

$\dot{V}_{god}$  - godišnji kapacitet LNG terminala Krk,  $Gm^3/god$

$\dot{G}_h$  - prosječni satni kapacitet LNG terminala Krk u kilogramima, kg/h

$\rho_{st}$  - gustoća prirodnog plina pri standardnim uvjetima,  $kg/m^3$

$\dot{G}_{h,maxs}$  - maksimalni satni kapacitet LNG terminala Krk u kilogramima, kg/h

$\dot{G}_{maks}$  - maksimalni kapacitet LNG terminala Krk u kilogramima po sekundi, kg/s

$\dot{Q}$  - maksimalni toplinski učin izmjenjivača, MW

Dinamička viskoznost – [Pas]

Koeficijent provođenja topline – [W/mK]

Specifični toplinski kapacitet – [J/kgK]

$\dot{G}_w$  - maseni protok morske vode u izmjenjivaču, kg/s

$c_w$  - specifični toplinski kapacitet morske vode, kJ/kgK

$t_{w1}$  - temperatura morske vode na ulazu u izmjenjivač, °C

$t_{w2}$  - temperatura morske vode na izlazu iz izmjenjivača, °C

$\dot{G}_g$  - maseni protok smjese glikol-voda u izmjenjivaču, kg/s

$c_g$  - specifični toplinski smjese glikol-voda, kJ/kgK

$t_{g1}$  - temperatura smjese glikol-voda na ulazu u izmjenjivač, °C

$t_{g2}$  - temperatura smjese glikol-voda na izlazu iz izmjenjivača, °C

$\dot{V}_w$  - volumni protok morske vode, m<sup>3</sup>/s

$\rho_w$  - gustoća morske vode, kg/m<sup>3</sup>

$\dot{V}_g$  - volumni protok smjese glikol-voda m<sup>3</sup>/s

$\rho_g$  - gustoća smjese glikol voda, kg/m<sup>3</sup>

$n_{wk,pr}$  - proračunski broj kanala s obzirom na uvjet maksimalne brzine (morska voda)

$b$  - širina ploče, m

$t$  - razmak između 2 ploče, m

$w_{w,maks}$  - maksimalna brzina nastrojavanja vode na ploču, m/s

$n_{gk,pr}$  - proračunski broj kanala s obzirom na uvjet maksimalne brzine (glikol-voda)

$w_{g,maks}$  - maksimalna brzina nastrojavanja smjese glikol-voda na ploču, m/s

$n_{wpl,pr}$  - proračunski broj ploča s obzirom na uvjet maksimalne brzine (morska voda)

$n_{gpl,pr}$  - proračunski broj ploča s obzirom na uvjet maksimalne brzine (glikol-voda)

$n_k$  - stvarni broj kanala

$n_{pl}$  - odabrani broj ploča

$w_w$  - stvarna brzina morske vode, m/s

$w_g$  - stvarna brzina smjese glikol-voda, m/s

$G_w$  - gustoća masenog protoka morske vode u kanalu, kg/m<sup>2</sup>s

$G_g$  - gustoća masenog protoka smjese glikol-voda u kanalu, kg/m<sup>2</sup>s

$\Phi$  - Omjer razvijene i projicirane površine valovite ploče

$X$  - Bezdimenzijski parametar grofiranja

$D_h$  - hidraulički promjer, m

$Re_w$  - Reynoldsova bezdimenzijska značajka za morsku vodu

$\eta_w$  - dinamička viskoznost morske vode, Pas

$Re_g$  - Reynoldsova bezdimenzijska značajka

$\eta_g$  - dinamička viskoznost smjese glikol-voda, Pas

$Pr_w$  - Prandtlova bezdimenzijska značajka za morsku vodu

$c_w$  - specifični toplinski kapacitet morske vode, J/kgK

$\lambda_w$  - koeficijent provođenja topline morske vode, W/mK

$Pr_g$  - Prandtlova bezdimenzijska značajka smjese glikol-voda

$c_g$  - specifični toplinski kapacitet smjese glikol-voda, J/kgK

$\lambda_g$  - koeficijent provođenja topline smjese glikol-voda, W/mK

$f_{0w}$  - faktor  $f_0$  za morsku vodu

$f_{1w}$  - faktor  $f_1$  za morsku vodu

$f_{0g}$  - faktor  $f_0$  za smjesu glikol-voda

$f_{I_g}$  - faktor  $f_1$  za smjesu glikol-voda

$f_w$  - Fanningov faktor trenja za morsku vodu

$\beta$  - kut grofriranja, °

$f_g$  - Fanningov faktor trenja za smjesu glikol-voda

$\Delta p_w$  - pad tlaka u izmjenjivaču za morsku vodu, Pa

$\Delta p_g$  - pad tlaka u izmjenjivaču za smjesu glikol-voda, Pa

$P_w$  - potrebna snaga pumpe za morsku vodu, W

$P_g$  - potrebna snaga pumpe za smjesu glikol-voda, W

$Nu_w$  - Nusseltova bezdimenzijska značajka za morsku vodu

$Nu_g$  - Nusseltova bezdimenzijska značajka za smjesu glikol-voda

$\alpha_w$  - koeficijent prijelaza topline morske vode, W/m<sup>2</sup>K

$\alpha_g$  - koeficijent prijelaza topline smjese glikol-voda, W/m<sup>2</sup>K

$k$  - koeficijent prolaza topline, W/m<sup>2</sup>K

$\Delta T$  - srednja logaritamska razlika temperatura, K

$T'_w$  - temperatura morske vode na ulazu u izmjenjivač, K

$T''_w$  - temperatura morske vode na izlazu iz izmjenjivača, K

$T'_g$  - temperatura smjese glikol-voda na ulazu u izmjenjivač, K

$T''_g$  - temperature smjesse glikol-voda na izlazu iz izmjenjivača, K

$A$  - potrebna površina izmjene topline, m<sup>2</sup>

$n_{pl,top}$  - potreban broj ploča s obzirom na potrebnu izmjenu topline

$d_u$  - unutarnji promjer cijevi, m

$n_{cj}$  - odabran broj cijevi



$m_s$  - broj upisanih šesterokuta

$n'$  - broj cijevi u dijagonali

$D_u$  - unutarnji proračunski promjer bubnja, m

$t$  - korak cijevi, m

$d_v$  - vanjski promjer cijevi, m

$e$  - usvojena udaljenost između cijevi i stijenke bubnja, m

$d_{ek}$  - ekvivalentni promjer, m

$D_{u,r}$  - realni unutarnji promjer bubnja, m

$Re_m$  - Reynoldsova bezdimenzijska značajka za metan

$\eta_m$  - Dinamička viskoznost metana, Pas

$Pr_m$  - Prandtlova bezdimenzijska značajka za metan

$c_m$  - specifični toplinski kapacitet metana, J/kgK

$\lambda_m$  - koeficijent provođenja topline metana, W/mK

$C$  - konstanta kod izmjenjivača cijevi u plaštu potrebna za izračun Nusseltove bezdimenzijske značajke

$Nu_m$  - Nusseltova bezdimenzijska značajka za metan

$\alpha_m$  - koeficijent prijelaza topline metana, W/m<sup>2</sup>K

$T_m'$  - temperatura metana na ulazu u izmjenjivač, K

$T_m''$  - temperatura metana na izlazu iz izmjenjivača, K

$L$  - minimalna potrebna duljina izmjenjivača, m

## SAŽETAK

Sve većom potrebom za prirodnim plinom kao energentom, raste i potražnja za odobalnim postrojenjima za prihvatanje, skladištenje i uplinjavanje prirodnog plina. Na takvim postrojenjima odvija se cjelokupni proces uplinjavanja prirodnog plina i isporuke u distribucijsku mrežu. Plutajuće postrojenje je najčešće prerađeno iz broda za prijevoz ukapljenog prirodnog plina, gdje se ugradi sustav za uplinjavanje. LNG Croatia je primjer takvog prerađenog broda. Maksimalna zapremnina broda je dimenzionirana tako da bi u osnovi trebala pokriti potrebe Republike Hrvatske za prirodnim plinom. Uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina, na LNG Croatia, odvija se indirektnim sustavom uplinjavanja. U indirektnom sustavu koriste se dva izmjenjivača topline, jedan pločasti i jedan tipa cijevi u plaštu. Pločasti izmjenjivač topline služi za izmjenu topline morske vode i smjese glikol-voda. Smjesa glikol-voda je u ovom procesu sekundarni radni medij. Glavna funkcija joj je prijenos topline morske vode na ukapljeni prirodni plin, kako bi isti izvršio promjenu agregatnog stanja iz tekućeg u plinovito. Izmjena topline između smjese glikol-voda i ukapljenog prirodnog plina odvija se u izmjenjivaču topline cijevi u plaštu. Na taj način ukapljeni prirodni plin se uplinjava na LNG terminalu Krk.

Ključne riječi: Odobalno postrojenje, ukapljeni prirodni plin, uplinjavanje, izmjenjivač topline, morska voda, glikol-voda, LNG terminal Krk

## **ABSTRACT**

With growing need for natural gas as an energy source, demand for offshore facilities for reception, storage and gasification of natural gas is also growing. At such facilities, the entire process of natural gas gasification and delivery to the distribution network takes place. The floating plant is most often converted from a ship for transport of liquefied natural gas, where gasification system is installed. LNG Croatia is an example of such a converted ship. Maximum volume of the ship is dimensioned so that it should adequately cover natural gas needs of the Republic of Croatia. Gasification of liquefied natural gas at LNG Croatia takes place in an indirect gasification system. In an indirect system, two heat exchangers are used, one a plate heat exchanger, and the other a shell and tube type. Plate heat exchanger is used for heat exchange of sea water and glycol-water mixture. Glycol-water mixture is called the intermediate liquid in this process. Its main function is to transfer heat of seawater onto liquefied natural gas, so that it changes its aggregate state from liquid to gaseous. The exchange of heat between glycol-water mixture and liquefied natural gas takes place in the shell and tube heat exchanger. In this manner, liquefied natural gas is gasified at the Krk LNG terminal.

Key words: Offshore facility, liquefied natural gas, gasification, heat exchanger, seawater, glycol-water, LNG terminal Krk